

现代自然科学普及丛书

今日天体物理

中国科技大学天体物理研究室



上海科学技术出版社

·现代自然科学普及丛书·

今日天体物理

中国科技大学天体物理研究室



上海科学技术出版社

现代自然科学普及丛书

今 日 天 体 物 理

中国科技大学天体物理研究室

上海科学技术出版社出版

（上海瑞金二路450号）

新华书店上海发行所发行　上海新华印刷厂印刷

开本787×1092 1/32　印张6.875　字数140,000

1980年11月第1版　1980年11月第1次印刷

印数 1—7,800

书号：13119·864　　定价：(科三) 0.58元

出 版 说 明

《现代自然科学普及丛书》是一套中级科普读物。为了发展我国的科学技术，赶超世界先进水平，有必要以辩证唯物主义的观点为指导，及时介绍当代一些基本理论问题、基础学科和发展较快的新兴学科、边缘学科，包括其基本内容、发展历史、目前进展概况和今后动向，供有关的干部、青年和科技人员参阅。

这套读物有数、理、化、生、天、地(包括气象、海洋)，以及有关现代农业、现代医学基础理论的选题多种，力求有中等文化水平的读者即能读懂。本丛书将陆续出版，欢迎同志们提出宝贵意见。

前言

一九七六年夏天，上海科学技术出版社的同志到学校来，约我们写一本通俗的册子，目的是介绍一下天体物理学的一些新进展。说实在，当时我们的心里是有些犹豫和不安的。一方面是由于那时的众所周知的环境和气氛，另一方面则因为我们都是七十年代以来才刚刚被“吸积”到天体物理圈子中来的，写这样的书，是不是相称呢？然而，最后我们还是下决心答应了出版社。因为，我们想，我们之所以被“吸积”不正是由于天体物理的这些新进展吗？这就是编写本书的最早的起因。

的确，天体物理的新的进展是不平凡的。我们来看看几个数字。在即将过去的七十年代中，诺贝尔物理学奖金一共颁发过十次，这中间就有三次是奖给天体物理领域的研究的(其中两次与其他领域的工作合得)。二十二位获奖者中，天体物理学家占五位，其他物理领域的人数分别是：固态及凝聚态物理九人；高能物理五人；核物理二人；光学一人。

诚然，我们不能仅仅以这几个数字为依据来评价各个领域之间的相对关系，但是，无疑地，它们多多少少从一个侧面反映着整个物理学的进展的面貌。在人类探索物理世界的现象和规律的进程中，天体物理是一个重要的方面，它曾经起过，现在仍然起着不可替代的作用。这一点已经由历史证明了。本书的内容就是打算给它再提供一些新的素材，新的证据。

因为力求新，就不免要涉及不成熟的东西。特别是，我们觉得，不能仅仅限于罗列一些观测上的新现象，应当而且必须介绍理论上的解释，包括那些目前还有激烈论争的理论观念在内。如果都已是有定论的材料，也就谈不上"新"了。实际上，提出理论上有意义的问题本身，就是一种重要的进展。因为，它会刺激人们去思想，"渴望看到(从现象世界到理性世界之间的)先定的和谐，是无穷的毅力和耐心的源泉。"(爱因斯坦)如果这些尚未到达和谐的问题能使某些读者，尤其是青年读者激发起无穷的兴趣和毅力，从而被吸积到今日之天体物理领域中来，那么，我们最初的犹豫和不安就算得到了最好的补偿。

这本书先是由方励之，张家铝、尤峻汉、周又元、王水、程福臻、褚耀泉及程富华等同志分章草拟了初稿，后来，又经华新民同志重新全面整理和统一、补充并改写而成。

一九七九年秋

目　　录

第一章　天体物理学的兴起

一谈起天体的学科，许多读者自然而然地会认为：它的“永恒”主题只是光耀的太阳、冷漠的月球、徘徊的行星、闪烁的恒星、迷蒙的银河……，尽管多么令人神往，终归是远离世间的天界。

今天看来，这种传统观念已经不正确了。其实，就在你的周围，在你的眼前，甚至在你的身上，已有不少天体的因素。可以说，我们每一个人的身体上都有恒星内部活动的痕迹，都有星际空间中作用的痕迹，都有银河尚未形成时代的痕迹。

构成地球上一切物体的化学元素，都经历过漫长而复杂的演化历程。人体中的元素也不例外。血红细胞中的铁，各种组织中的碳、氮，骨骼里的钙，呼吸着的氧，都是在恒星内部高温条件下形成的，比较轻的元素，象锂、铍、硼，则来自极其空旷的星际环境中宇宙线的作用。至于最轻的元素，如氢、氦，它们的起源至少要追溯到银河系诞生之前。

长期以来，人们觉得，地球提供了我们生活的自然条件。比起其它星球来，我们对地球这颗行星，有格外的亲切感。“地球，我的母亲！”就是诗人的赞美词。这一点自然无可非议。可是，只要我们把眼界稍许放宽一些，就不难觉察，这种赞颂多少有些失之狭隘。实际上，地球不是孤立的，在宇宙大体系中，地球只是一名小小的成员，它的成长、发展、变化，从最深处的地核到最外缘的磁层，从生命的起源到人类的文化史，无一不是同周围天体的过去和现在有着千丝万缕的联系。

为了对这种紧密联系有一个粗浅的印象，我们再举化学元素来说。远在太阳系还没有出现的时候，某些恒星就已到了晚年，成为红巨星，当它们进一步衰亡之际，还常常发生非常猛烈的爆发，天文学上称作超新星爆发。现在知道，比铁重的元素，都是在红巨星里，或者在短暂的超新星爆发事件中产生的。地球上现存的重元素，除了为数极少人工制造的以外，全部都是这些爆发遗留下来的"灰烬"。铜器时代的鼎瓤，中古炼丹家手中的汞制剂，传播文化的铅字，原子能工业用的铀和钍，不外都是超新星"灰烬"的制品。不妨设想，如果当年(即50到100亿年之前!)没有那些爆发，或者爆发的情况略有不同，这一段历史又该是一番怎样的景象?

天和地之间有怎样的相互联系、相互作用?怎样立足于地面去探索天体的本质?又怎样从天体的广阔角度来认识我们生活的局部，认清我们自己?天体物理学的进展，逐步深入地回答了这些问题。这也就是我们将向大家来讲的事情。让我们从回顾古代开始吧!

古老的渊源

在今天，已经很难划清天文学和天体物理学的界线了。它们几乎融汇成了统一的整体。可是，在古代，两者的遭遇却迥然不同。天文学有灿烂而悠久的历史。巴比仑、埃及、中国、希腊、阿拉伯的古代天学家的成就，直到今天还值得称道，并有实用的意义。而另一方面，算得上天体物理学的成果，在古代是相当贫乏的。原因在哪里?

天文学，是从观察日月星辰的分布和升没开始的。天文一词的字面含义就是天体的现象。在希腊文里，天文也是由"星星"和"习性"两个词合成的。星星的分布和升没等习性，

用肉眼就观察到不少，这给天文学提供了丰富的实践基础，使它的蓬勃发展有了雄厚依据。而所谓物理，意即本性。天体物理学的目的就是探讨天体的本性，这立即会面临一个很大的困难：用什么方法才能探索我们不能到达的遥远天区？或者，更根本的问题是：有没有可能认识我们还不能到达的天体？

在古代的欧洲，前后几乎两千年间，正统的答案是亚里士多德的两个世界论，他认为，月亮以上与月亮以下是两个截然不同的世界，是由本性不同的物质组成的。在《天论》里他写道：

> “简单的物体将有简单的运动”。“如果运动向上，物体则是火或气；如果运动向下，物体则是水或土”。天体是作圆周运动的，“所以，推论是显然的：存在着一种天然的质料，它不同于我们月下世界中的四种质料，并且，比起所有四种质料来，它具有更多的神性。”

意思是说，月上世界的天体都做简单的圆运动，地面附近的物体只有或上或下的运动，不同运动形式表示本性不同的物质，月下世界的质料是火、气、水、土，月上则是完全不同的神性东西。这样，除了天体更富有神性这一点外，我们不可能再有任何进一步的认识了，因为它全然不同于我们所熟习的火、气、水、土，在这种思想的束缚下，研究天体的本性自然都被看做荒唐的事。

黑暗的中世纪，亚里士多德的观点被进一步神学化，成了不准怀疑的经典。谁要探讨天体的物理本质，谁就是亵渎神灵。所以，那个时代关于天体本质的著述，除了一幅幅荒诞无稽的天堂地狱图外，没有丝毫可取的东西。

两个世界等错误观念之所以能长久地占据正统地位，也是由于当时的生产水平低下，缺乏有力的观测和实验手段，即

便具有唯物主义倾向的科学家，对天体的性质也提不出令人信服的判断。我国古代的元气论者，虽然尖锐地批判了天体神创论。但是，在天体的构成上，一直超不出"彼上而玄者，世谓之天；下而黄者，世谓之地"（柳宗元）之类的泛论。天地玄黄等等，依旧是思辨的、脱离实践的、经不起推敲的。这种探讨不可能在自然科学上结出积极的果实。

然而，在古代不利于天体物理学发展的总背景上，也有个别引人注目的思想。两千五百年前的希腊，有个比亚里士多德还要早的哲学家，名叫阿那克萨哥拉。他根据陨石推断，太阳是一块又大又红又热的石头，月亮是由泥土构成的。这个推理固然浅显，意义却深长。首先，他没有古代对天的迷信，认为天上的东西和地面东西是由同类物质组成的。其次，他不是凭借先验的猜测，而是使用科学的方法来推理。根据陨石研究天体，直到今天还是天体物理中一种有用的手段。

陨石是罕见的，而且，只有极少数天体可以成为陨石落到地面上来，所以，陨石方法不是普遍适用的。普遍适用的方法应当是研究每个星体都能传给地球的东西，这就是星光。星光时时刻刻都可以在地球上观看或接收，所以，分析天体的光学性质，是天体物理的最基本的方法。古代也有人使用过这种方法，东汉时的张衡就是著名的一个。

"夫日譬犹火，月譬犹水，火则外光，水则含景"。这是张衡在解释日食成因时说的一句话。大意是：太阳象是火，月亮象是水，因为火会发射光，水会反射光。张衡的结论与阿那克萨哥拉十分相近，但使用的方法又前进了一步。他没有根据陨石（太阳、月亮上的物质也不会成为陨石），而是根据天体的光学现象（太阳发光、月亮反光），再对照地面上物质的光学特性（火发光、水反光）而得到结论的。这样做，不仅要认识到天

和地的物质构成是相似的，而且要认识到地面物质所遵循的物理规律对天体照样适用。这两点，正是现代天体物理学最重要的依据。

从思想渊源的意义上来说，阿那克萨哥拉、张衡等都堪称为天体物理学的先驱。但是，他们的事业都没有后继者加以发扬光大。在漫长的古代历史中，这些富有开创性的思想闪光，好象暗夜里突然出现的新星一样，自生而又自息了。直到十九世纪，当重新开始研究星体的发光性质时，才真正揭开了天体物理的第一页。

成为独立的学科

1859 年，德国物理学家基尔霍夫有一次在研究太阳光谱的时候，把食盐的火焰放在太阳光束上，出现了他意料之外的结果。后来，弄明白了原因，他断定：太阳上必定存在着食盐中含有的钠元素。这件事成了天体物理学诞生的标志。

什么叫光谱？如何从光谱判断太阳中含有钠？这对了解整个天体物理学都十分重要。天然的光谱人人都看到过，雨后的彩虹就是太阳的光谱。它是阳光经受小水滴的折射后形成的，小水滴的折射把太阳发射的不同颜色的光分解开了。所谓光谱仪，它的作用同小水滴相似，也是用来分解光束中不同的颜色，不过分解能力更强、更精密。利用光谱仪再看太阳的光谱，就发现在红橙黄绿青蓝紫的彩色背景上，还有些极细的暗线。早在 1802 年就看到这些暗线，当时并不清楚它的含义，还以为是各种颜色之间的天然界限。

后来，又研究其它光源的光谱。用不同成分的物质放在火上烧，就能做出多种光源。观察发现，这些光谱由一系列的亮线组成，而且，不同元素对应着不同的亮线系列。钠的最亮

线是黄色，氖的最亮线是橙红色，钙的最亮线是紫色。这些线称做特征发射线。由亮线组成的光谱，叫发射光谱。根据发射光谱中有哪些特征谱线，就可以推断光源里面有哪些元素。化工、冶金等工业常用这种光谱学方法来分析材料的成分。不过这是后话了，光谱分析方法正是脱胎于天体光谱的研究。

回过来再说基尔霍夫的实验。他让太阳光束通过食盐的火焰再进入光谱仪。他原以为，太阳光再加上食盐的光，光应增强，应当在原来的太阳光谱上多出钠发射的黄色亮线来。结果适得其反，在应该出现亮线的地方却出现了暗线，并且，暗线的位置恰恰与太阳光谱中原有的两条暗线相重合。

意外的结果往往更能启发人。这个现象意味着，如果亮线表示发射，暗线就表示吸收。在太阳光照射下，火焰中的钠主要作用不是发射光，而是吸收光。这个性质并不奇怪。你可以作一个小实验来证明，拿一支蜡烛，在黑暗的环境中，烛焰是光亮的，如果把蜡烛放在光亮的背景前(如碘钨灯前，或太阳方向)，烛焰所在范围并不形成亮背景上更亮的区域，反而相对背景要暗一些。这时，我们会说烛焰把背景光挡住了。所谓"挡住"，用物理语言说，就是光被吸收了。

按照这个分析，太阳光谱中的暗线应是由太阳外层大气中物质的吸收造成的。发射的亮线和吸收的暗线在同一位置这一事实说明，同一元素如果能发射某种特定颜色的光，在吸收过程中，它也只能吸收这种特定的光。或者说，同一元素的发射与吸收的特征谱线是一样的。既然在太阳光谱的暗线中有钠的特征线，那么，结论只有一个：太阳大气中必定含有钠。暗线构成的密码，从此被看懂了。

早在1814年，有个望远镜制造家夫琅和费，就曾认出太阳光谱中有574条暗线，并标上了名字，这些名字至今还在使

用。夫琅和费当时也已察觉，有的暗线位置同铁元素的特征谱线完全相合，但是，他没有能从中得出基尔霍夫的结论。这并不偶然。因为，要了解暗线的实质，必须对光的吸收和发射性质有比较深入的了解。这在夫琅和费身上是不具备的，所以，他没有能从他自己的发现再前进一步。天体物理学的第一个事件就说明，只有在生产发展提供了更新更精密的仪器的条件下，在地面物理学获得了越来越深入的物质运动规律的条件下，对天体才可能有更多的了解。这种依赖关系，在天体物理的整个发展史上一再表现出来。

目前，已经对上千条太阳光谱中的暗线作了证认，在太阳上找到了 67 种地面上的元素。受到太阳光谱研究获得成功的鼓舞，天体物理开展了恒星光谱的研究。由于星光太微弱，拍摄恒星光谱是十分艰苦的工作，为了得到一颗星体的光谱，往往要整夜地守候在望远镜旁。尽管如此，到二十世纪初，已经积累了数十万颗恒星光谱的资料。在同一时期，对地面物质的光谱也开展了广泛的研究，各种原子、分子、离子特征线位置都被标定了，编制了数以十万计的特征线的“档案”。现在，根据星体光谱，经过查对特征线位置的“档案”来证认天体的组成，已是例行公事了。这不仅彻底推翻了月上世界有神性物质的谬论，而且表明最遥远的天体，也是由地面上这些元素构成的。

光谱能告诉我们的消息，除了星体的物质成分外，还有其它内容，根据光谱线的许多细小特征，例如线的强弱，线的粗细形状，线位置的微小移动等等，我们可以推测星体上不同物质的含量比，星体的运动速度，星体转动的快慢；星体表面的压力，温度，星体上的磁场强度等。

古代的占星家宣称他们能领悟星光昏明变化的启示，预

卜人间的悲欢离合，自然是骗人的勾当，不过，星光的确满载着信息，几千年来人们一直"熟视无睹"。光谱分析方法的发展，才使我们能通过星光来探听天外的消息。从此开始，摆脱了思辨和猜测的原始阶段，天体物理学正式成为一门基于科学实验的学科，走上迅速发展的大路。

从地到天的巨大成果

天文学和天体物理学，确切地说都是从地到天的学科。它们的对象是天，但研究手段全靠地面上的观测，实验和分析，直到近二十年来，才有一部分结果来自直接上天的探测，但也只限于太阳系范围。所以，如果要谈从地到天的巨大成果，应当罗列天文学和天体物理学的全部重要内容，这样做，当然会使人们对这门学科的成就惊叹不已，但同时也容易使人忘掉它所经历的曲折，实在说，不了解错误，就不会真正弄清楚正确。

象许多其它学科一样，天体物理学的进展有一部分是比较平稳的，延续性的，譬如，从太阳光谱转向恒星光谱，除了技术上的困难以外，在理论概念上是自然而然的。另一部分进展则是在克服错误观念的论争中取得的。后者对学科发展的作用往往更大。

天体物理所碰到的错误观念，大都涉及对天地关系的认识。还是先从克服两个世界论谈起，虽然这个例子已是较老的历史了，但并非没有现实意义。亚里士多德在论证两个世界的时候，也有他的观测依据，这就是"天上与地下的物体运动形态有很大差别，前者是不停顿的圆运动，后者是短时间的上升和下降"。而且，当时的确没有看到过两种运动方式之间的相互转化。在这种情况下，产生两种运动绝对不同的观念，

并不是奇怪的事。

万有引力定律等力学规律的发现才表明，必须抛弃两种运动方式的差别具有绝对意义的观念。现在谁都知道，两种运动方式是可以转化的，只要火箭速度足够高，就能把地面物体发射成天体，使它做不停顿的圆运动。但在三百多年前，既没有看到转化的现象，又有两个世界正统观念的束缚，敢于打破两种运动的界限，确是一个革命性的飞跃，无怪乎它的影响波及整个自然科学。总结教训的话，那就是：把天地之间的差别夸大到绝对，就会成为天体物理发展中的一大障碍。

每当发现一种新奇的天象，一时又不容易解释，就容易产生上述类型的错误观念。关于类星体及星系核的讨论，就是一个现代的例子。类星体和星系核，在第七、八章中还要专门谈。它们的基本特征是能量特别大，变化非常快，光谱也不同一般，是一种目前还解释不了的天体。于是，有些人宣称，类星体或星系核是由完全不同于地面的规律支配着。这种解释固然又“省力”又“简单”。可是省力和简单并不是真理的标准。两个世界论就是一个值得经常记住的“简单”但荒谬的先例。天地的差别很大，甚至极大，然而，如果只看到这一面，否定统一的一面，就会走向错误的结论。

相反，如果只看到统一，忘掉差别，也是错误的。王充在《论衡》里就有这么一个论证。王充反对天体是球形的，尽管日月之圆如此昭然，但他却说：“在地水火不圆；在天何故独圆？”意思是，地面上水火等物质不具有圆形，由水火等物质构成的天体，怎么会是圆的呢？他的逻辑是：地上没有的，天上也不应该有。这同样是一种形而上学。事实上，由于天体质量很大，自身引力很强，稳定的天体大都是球形或盘形的。地面物体质量较小，自引力很小，才有“不圆”。

再讲一件现代的事，1932年发现了中子。随后不久，提出了存在中子星的假说。这种星全由中子组成，它很小，直径只有几十公里，但很重，质量比太阳还大一些，所以密度高得不可想象，一个直径几十米的中子星物质球抵得上整个地球的质量。这个预言完全出自受过检验的物理规律，也符合恒星演化的序列，并预言它是超新星爆发后的产物。可是，就因为它的物性太不寻常了，所以，中子星假说一直遭到不讲道理的反对，被攻击为物理游戏，甚至讥讽道："究竟有多少个天使能在中子星头上跳舞呢？"三十多年之后，1967年，天文观测在无意中发现了这种奇异的天体（详细情况见第五章）。讥讽者最终受到了讥讽。

围绕星系普遍退行观念的论争，也是一个好例子。1929年，哈勃发现星系谱线的红移与距离成正比。解释这种现象的一种模型是：星系构成的体系在做膨胀式运动，通常叫做膨胀模型。这种模型一经提出，就受到不少反对。分析反对者的论据，一部分是有分析和论证的，也有相当一部分实质上是出于偏见。自古以来，人们肉眼常见的天空景象，除了大规模的转动外，其它变化是很小的，所以，大规模的转动图象还比较容易被接受，大规模的膨胀运动则由于与人们潜在的成见相抵触而受到"不可想象"、"离奇"之类的责难。所谓"不可想象"，说穿了，就是不可按熟习的常规去想象。囿于成见，以"离奇"性作为衡量真理的标准，只是眼界窄小的反映，王充固执于地面环境的现象，对日月的圆形视而不见的教训，在今天还是值得吸取的。

地球是最宜于人类生活和发展的星球，然而，它的窄小环境，也留给人们许多偏见和成见。如果说天体物理学有什么巨大成果的话，那么，逐步认清这些偏见和成见，就是其中重

要的一项。天体物理学就是在不断摆脱狭隘的偏见和成见中发展的。只有经过这些论争，我们才能满怀信心利用地面上得到的物理规律去探讨天的本质，才能睁开眼睛发现地球上没有的“离奇”事物。

从天到地的著名事例

还有另一类偏见，原则上不反对天体物理学课题的重要意义，但总有疑问：这种研究，对生活在地球上的人们有多少实际价值呢？作为回答，我们来讲几个著名事例。

1874年，研究日食情况下拍摄的太阳色球层光谱时，发现在钠的谱线旁边还有一条陌生的线，地面实验室中从来没有见到过这条谱线，不知道它是由什么元素发射的，只好认为它是太阳上特有的一种元素，取名叫氦，原义就是太阳的元素。三十多年之后，几个物理学家在地球上竟也找到了氦。这件事，使化学家有点难堪，发现新元素，本来是化学的事，却被天体物理抢了先。为什么地球上明明有的元素，反而在遥远的太阳上先发现？原因很简单，太阳和其它恒星中氦的含量很高，按重量达到30%，而在地球上，氦却很少。氦是惰性气体，很难在化合物中找到它。它又很轻（仅次于氢），很容易逃出地球，地球太小了，吸引不住它，所以地球大气中也难找到氦，只有某些放射性元素在蜕变过程中能放射出一点点氦，化学家一直没有抓住它的踪迹。

第二个例子，还是关于谱线的。1880年，在行星状星云（围绕着一颗热星的环状星云）光谱中也发现了一条地面上没有的谱线，沿用氦的先例，取名为氢，意思是星云的元素。与氦的结局不同，在地面上寻找这种新元素的努力都失败了，而且，在元素周期表中也找不到那里还留有这种新元素的位置。

直到1928年才弄清楚，“星云的元素”就是最常见的氧，那条谱线是氧离子发射的。为什么在地面上没有看到呢？原来发射这条谱线有一个条件，气体密度要很低，使气体分子间的碰撞很少，不然的话，碰撞会阻碍发射这条谱线，实验室的体积有限，要达到如此低的密度，气体总量就很少，总量一少发射强度就很弱，以致观测不到。既要密度低，又要总量大，实验室里很难办到。在天体上同时满足这两个条件却轻而易举，天体的体积很大，足以保证气体很稀疏而总量又很大，行星状星云、太阳日冕区都符合这两点要求，所以，它们的光谱中会出现地面上看不到的现象。

俗话说：得天独厚。这用来形容天体物理学是相当贴切的。现代物理学经常追求一些极端的反常的条件，诸如高能量，高温度，高压力，高密度，强磁场，强辐射等等。可是，如果拿地面实验室中达到的纪录与天体上的高能量、高温度等等相比，就是小巫见大巫了。有人说，天体环境是物理学的更广阔更丰富的实验室。这话在一定意义上是正确的，借助于天体实验室，我们可以看到许多地面实验室中没有的现象，可以获得从地面实验不容易获得的概念。

热核聚变就属于这种来自天上的概念。上个世纪后半叶，一般认为太阳的能源是引力收缩，就象河水从高处流向低处时会释放能量一样。如果太阳上的物质慢慢向中心收缩，也会放出能量形成太阳的光和热，用这种方法估算，只要三千万年左右，太阳的能量就要耗光了。可是，地质学证明，地球至少有几十亿年的历史，围绕这个矛盾，有很多争论，人们怀疑引力收缩是太阳的能源，可又找不到其它的出路。直到1939年，才有了正确的解释：热核聚变反应是太阳及其它恒星的能源，它足以维持太阳几十亿年的寿命，今天，热核聚变

被认为是最有前途的能源之一。许多物理实验室正在积极研究如何用可控的核聚变反应来供给动力的需要。一旦这个目标达到了，人类又征服了一种巨大的自然力。古代西方有一个神话，说给人类带来文明的火，是由一个叫做普罗米修斯的盗火者从天上偷下来的，当受控热核反应这个新火种第一次点燃起来的时候，请不要忘记，它也是从天上“偷”下的，天体物理学是它的普罗米修斯。

天体物理学逐步建立了从天的尺度探讨问题的科学方法，它的影响，无论理论上或实践上，都是深远的。我们一再谈到过地球环境的狭隘性，它是许多无知和偏见的环境根源，其实，就连地球环境本身也是天体相互作用的产物。日夜交替、寒来暑往、春华秋实等等景象年复一年地再现，好象是不会受任何影响的自然轮回，用不着丝毫怀疑它的永恒性，无限性。真正的情况正好相反，地球特有环境的存在，是靠天体间许多精巧的平衡维系着。天体物理还告诉我们，平衡都不是永恒的，无限的，其中任何一个环节上的变化，都将在地球上产生反响。此外，随着人类活动范围的扩大，环境的含义也越来越大。二十年前，气象学的范围大体就包括了环境的全部，今天整个日地空间都算是环境了。所以，一部分天体物理的内容正在转变为气象学那样的环境科学，直接为人们的日常活动服务。

我们后面谈的一些新进展，大部分还是遥远天区的事，还不在人们目前活动的环境之中。可是，时间的流逝总是把人们带向未来，对于不仅关心现在，而且关心未来的人，都不应当忘掉天体物理学。

第二章　新　视　界

大型光学望远镜的建立

天文学上的革命是从哥白尼发表日心说开始的。但比这稍晚一点，一场意义同样深远的革命也开始了，这一点却并不为所有人都认识到。这就是1610年1月7日，伽利略(图2.1)用他的自制望远镜第一次指向天空，靠它发现了太阳上的黑子，月亮上的环形山，还发现了木星周围有四颗卫星在绕着它运动。世界上第一个最简陋的望运镜就作出了如此众多的惊人发现，表现了它探索宇宙的巨大威力！



图2.1　伟大的意大利天文学家和物理学家伽利略 (Galileo Galilei, 1564～1642)

伽利略当初制造的望远镜非常简单，就由两块透镜和镜筒组成。前面一块是凸透镜，称为物镜。后面一块是凹透镜，叫做目镜。适当调整物镜与目镜之间的位置，就可以把远处物体放大。物镜和目镜各自的焦距之比是决定望远镜能力的重要参数，叫做放大倍数。伽利略望远镜的放大倍数是30。

标志望远镜性能的除放大倍数以外，还有集光能力和分辨本领。它们都与望远镜的口径——物镜的大小有关。物镜的直径越大，收集到的光线越多，则本来看不见的暗弱天体也能收进眼底。同样，望远镜口径越大，它的分辨本领，也就是

看清物体细节结构的能力也越大。因此，增大望远镜的口径，以便从宇宙收集到更多更清楚的信息，这是天文学家长期致力的一个目标。1943年，新制成的大口径望远镜成功地把仙女座大星云的核心部分及其两个椭圆形伴星云分解成一个一个的恒星，这就给长达一百多年的关于星云本质的争论下了最终的结论。目前世界上口径最大的望远镜已达到6米(图2.2)。大口径望远镜是很难制造的，它标志了一个国家在光学、电子学、自动化、精密机械等方面的技术水平。例如美国帕洛玛山上的5.1米口径的望远镜，其镜面重5吨，在一种特殊的玻璃的表面上镀铝而制成。镜面要精确地研磨和抛光，仅这一项工程就花费了11年(其中因第二次世界大战而停顿了4年)。镜面面积为20万平方厘米，可是精度很高，误差不超过百万分之二点五厘米。望远镜的可转动部分重几百吨，安装在十几层楼高的建筑物内。它的平衡系统非常灵巧，只要用手指推一下，就可以使它转动(见图2.3)。

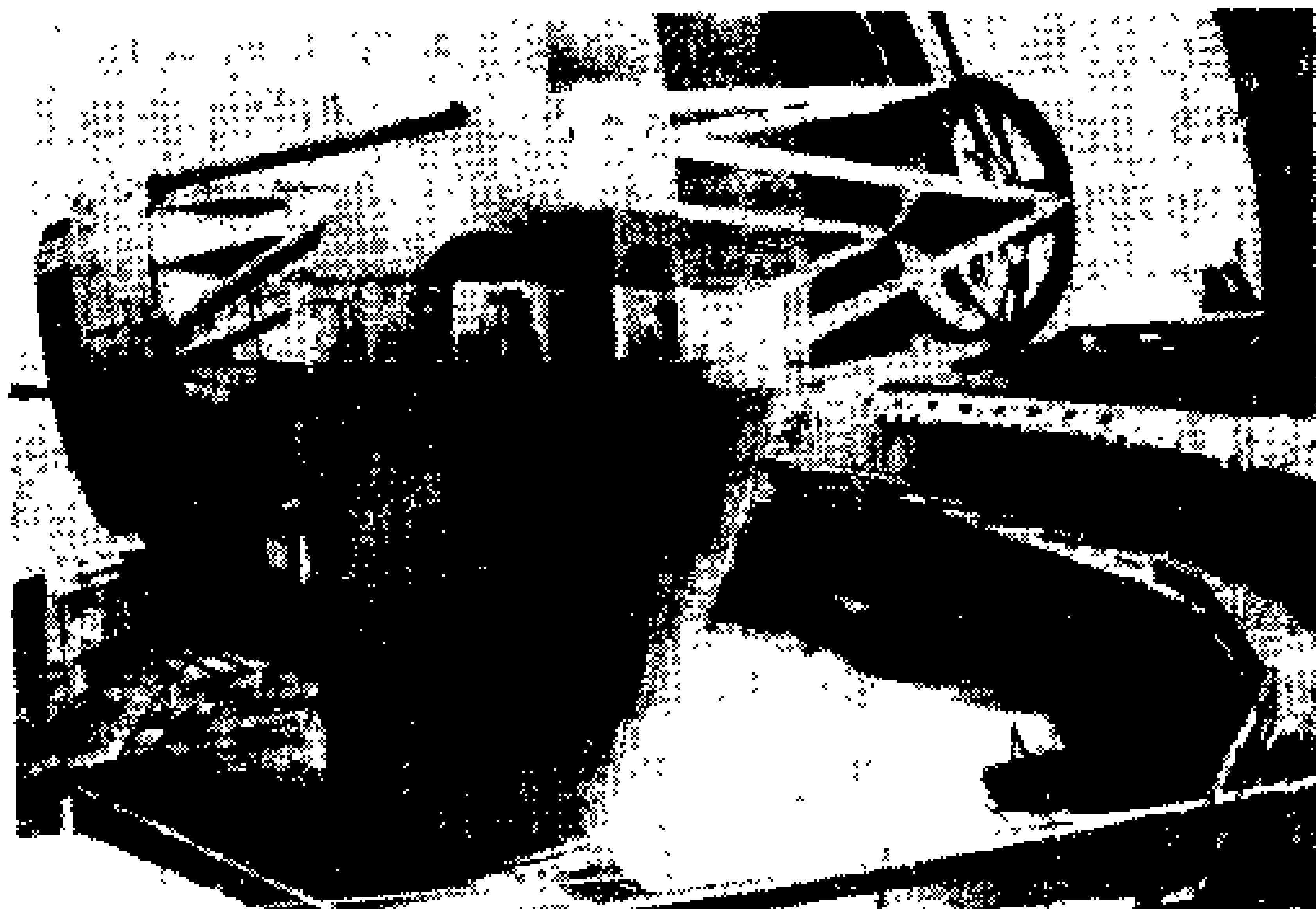


图2.2　世界上最大的光学望远镜，苏联的6米口径反射望远镜

当然，制造大型光学望远镜的巨大困难也是可以想象的，而且由于大气的不规则流动对光传播的影响以及光的衍射等因素，制造大口径望远镜，也并不能无限制地改善望远镜的性能。例如，地面上望远镜的分辨本领在口径为1米半左右即达到了极限，目前达到的最高分辨率约为1～2弧秒，相当于在4公里远处能看清一张邮票的大小。这个分辨率虽已很了不起，但是不能满足天文观测的要求，例如我们无法看清最近的恒星的表面。为了进一步提高分辨本领，科学家用最新的电子技术来武装望远镜的接收、成象和显示系统，对于得到的天体象用计算机存贮和进行处理，用这种办法目前已把分辨率提高到百分之几弧秒，相当于能看清上百公里以外的一张邮票的大小！例如，美国基特峰国家天文台的天文学家就用这种办法在4米口径的望远镜上拍摄了超巨星参宿四（猎户座α）的照片。经计算机处理后的电视象第一次"看清"了一颗恒星的圆面，还依稀显示了它上面的亮区和暗区以及同太阳相



图2.3 美国帕洛玛天文台的5.1米口径光学望远镜是世界上最大的光学望远镜之一

似的光球和色球。

为了减少制造大口径望远镜的困难，科学家采取了化整为零的办法。将在1979年投入使用的多镜面望远镜(图2.4)就是这方面的一个尝试。它建在美国亚利桑那州南部海拔2600米的霍普金斯山上，由六个镜面组成，每个镜面直径为1.8米，排列成一个圈。它们可以同时瞄准一个天体，在共同的焦点上聚焦成象。这样制成的望远镜集光能力相当于口径为4.5米的望远镜。但制造1.8米的镜面要比制造4.5米的大镜容易得多。这样的多镜系统为了使六个镜面步调一致并聚焦于同一点，使用了计算机来进行控制。在这样的望远镜的基础上，科学家们正在设计下一代的地面望远镜，有一种方案考虑用几百个1～2米的镜面组成阵列，用激光监测每个镜面的精确位置，由计算机控制来统一步调。这样的望远镜相当于一架口径25米的望远镜，但避免了制造大型镜面的困难，几百个小镜面可以用新工艺成批生产。这样的望远镜比

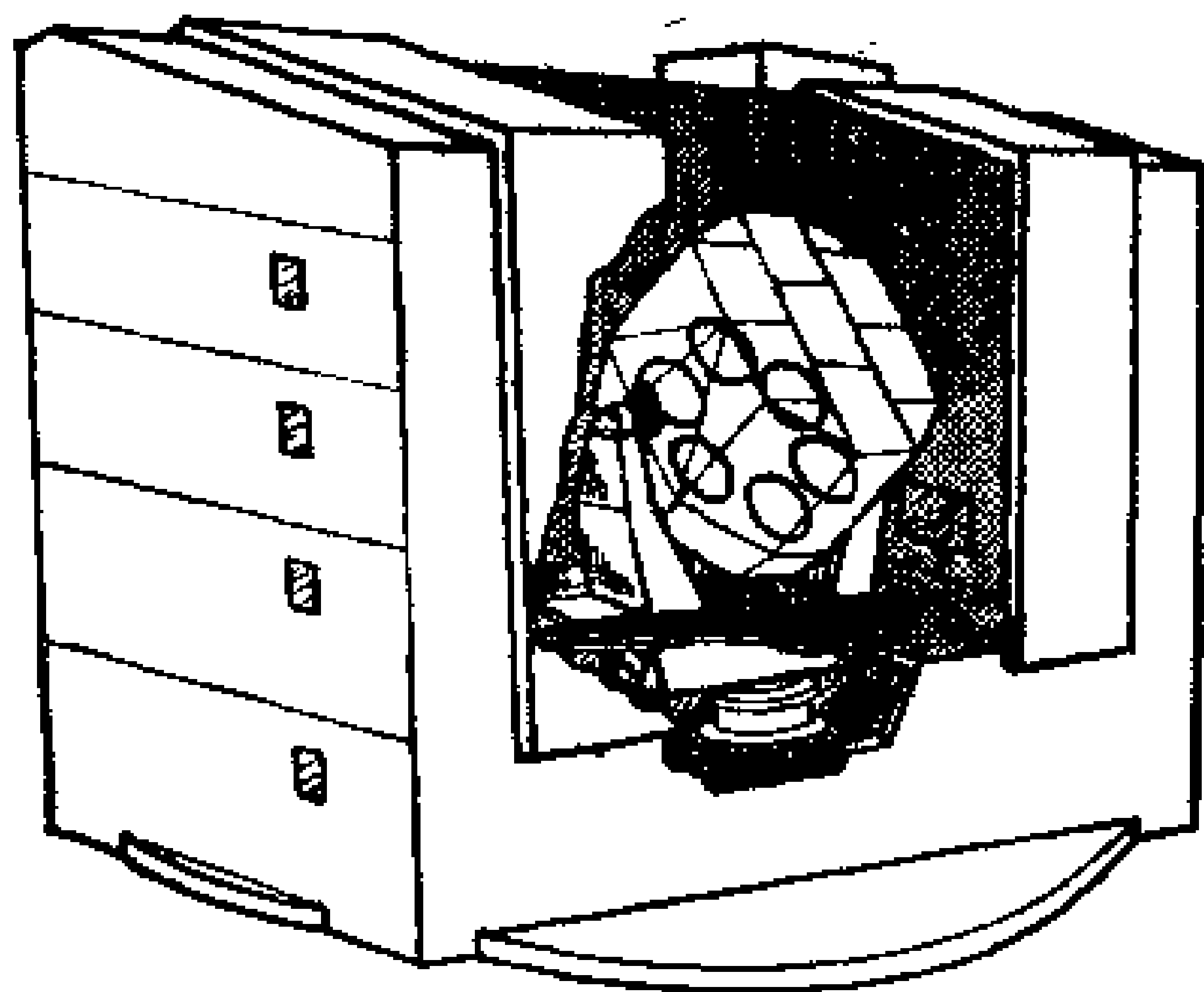


图2.4　多镜面望远镜及其建筑剖视图

现在的5米望远镜集光能力大25倍，分辨率高5倍，它将有可能直接观测到其它恒星的行星系统。

大气的紊乱流动会造成天体象的畸变，这是天文学家深感头痛的一件事，近年来，他们发展了一系列方法来抵消这方面的影响，取得了一定成功。另外，人们设法在大气层外的卫星或其它飞行器上装上望远镜(图2.5)。随着航天飞机技术的成熟，天文学界正在计划把大型望远镜送上天空去，完全摆脱大气的阻挡和捣乱。例如有一个计划设想把12米长的“空间望远镜”送上卫星轨道(见图2.6)，它的口径达3米，重11吨。预计在八十年代初可用航天飞机将其部件送入太空，在空中装配。宇航员可定期前往维修或更换实验仪器以进行不

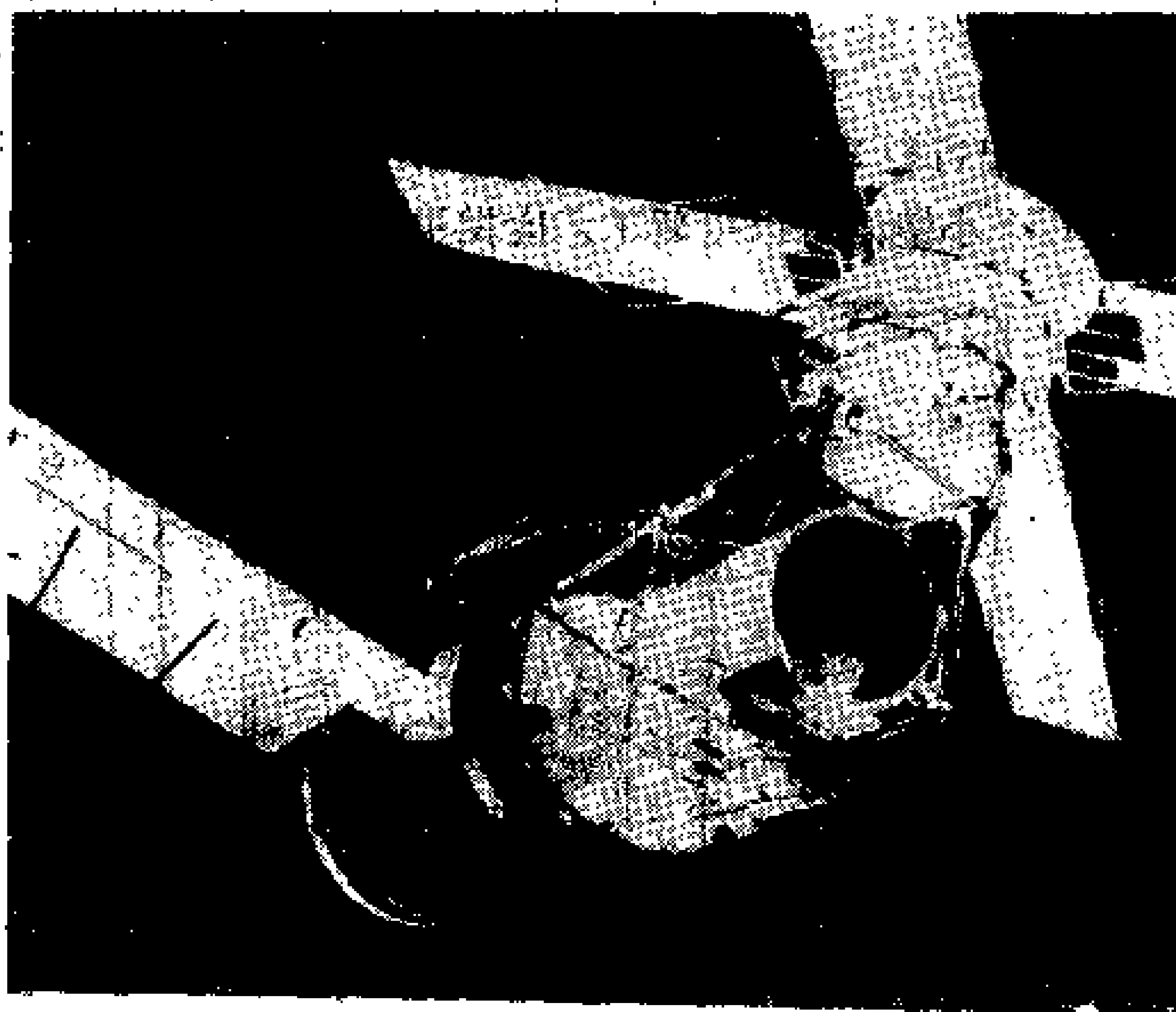


图2.5 天空实验室在空中的照片，是由宇航员摄下的，上面装有望远镜

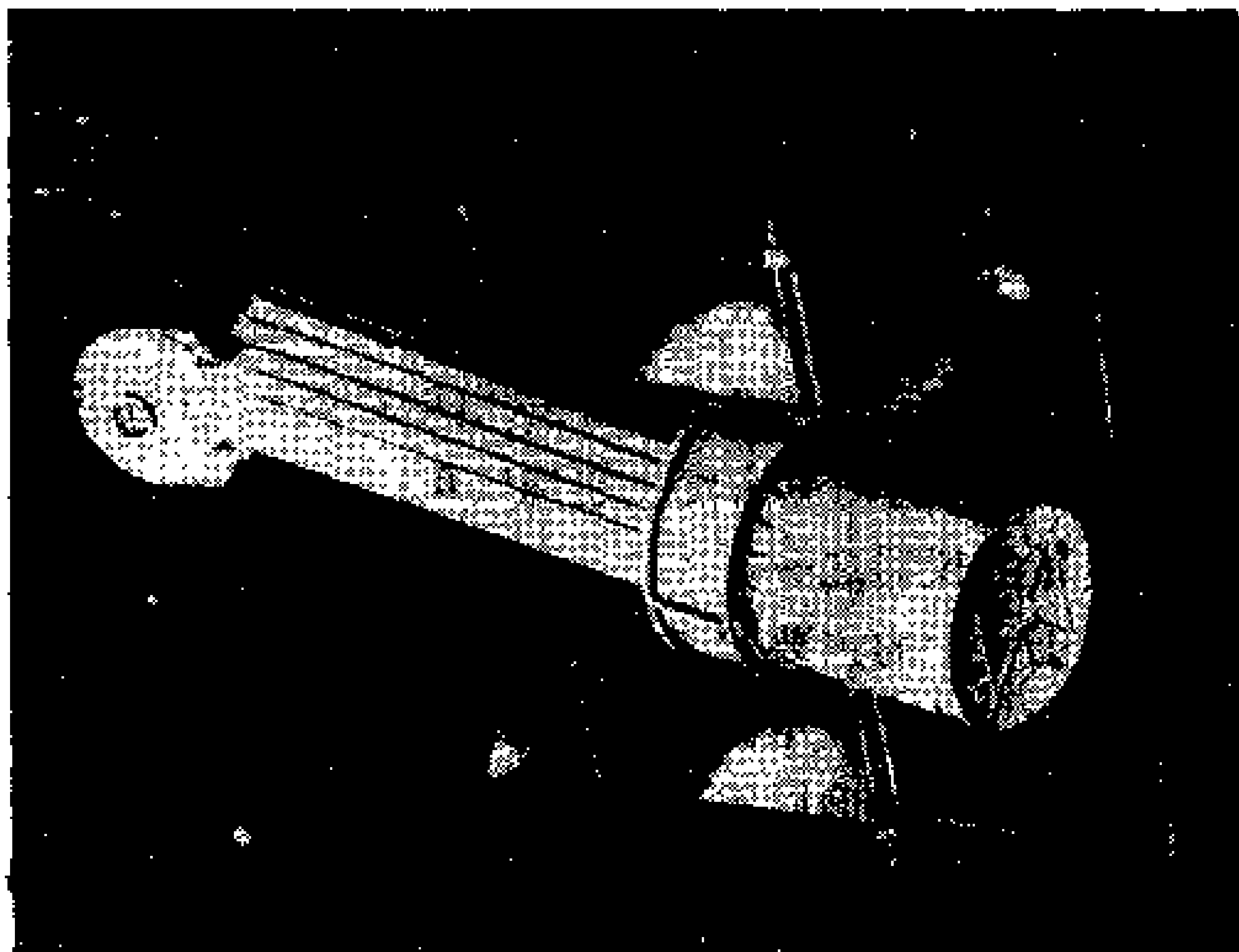


图 2.6　设想中的空间望远镜的一个方案

同的实验项目。在没有大气的空间进行观测，预计可以看到比目前地面上最好的望远镜所能看到的最弱的天体还暗一百倍的天体。分辨率可以达到能监测其它行星上的风暴等气象变化的程度，观测资料由通信卫星发回地面站。

天文学家预计，当这样的空间望远镜上天之后，加上前面提到的地面上的下一代望远镜，将使观测天文学的许多领域发生革命性的变化。光学望远镜这种古老的天文仪器在天文学的新时期将会继续作出新的贡献。

从一张白纸谈射电天文学

事情发生在英国剑桥附近的射电天文台举办的一个小型展览会上。参观者被邀请到一张台子面前，上面放着一迭整齐的白纸片，主持者让每人拿一张。人们被弄得莫名其妙，把

手中的白纸翻过来一看才恍然大悟。原来纸背面写着这样的话：你可知道，当你从桌上拿起这张纸片时，所付出的能量比全世界全部的射电望远镜在其全部历史中所接收的能量还要大！这话一点也没有言过其实。它形象地说明了射电望远镜是一种多么灵敏的仪器，而从事射电天文学研究又是多么精细和艰巨的工作。事实上目前的射电望远镜可以测出小到 10^{-29} 瓦/米²·赫的功率密度。它确实可以称得上是人类所建造的最灵敏的仪器之一。

射电天文学的主要工具——射电望远镜，主要用于接收来自宇宙空间的无线电波。它实在不象什么"镜"，倒很象雷达。事实上，它的确同雷达有密切的血缘关系。射电望远镜资历浅，可是年轻有为，诞生四十多年来已经对天文学作出了许多重要贡献。射电天文学很快成为天文学的一个蓬勃发展的重要分支。

说来奇怪，第一个发现来自宇宙的无线电波的，不是天文学家，而是一位美国的电信工程师，他的名字叫做卡尔·詹斯基(图 2.7)。1928 年，大学刚毕业的詹斯基来到霍姆代尔的贝尔电话实验室工作。当时，贝尔电话公司刚安装了横跨大西洋的短波无线电通信线路。詹斯基的任务就是研究短波通信中的各项干扰因素。当时对 30 米波长以上的无线电波已有了较细致的研究，而对 1.5～15 米波长范围内的短波则还没有作过系统研究。为了进行这项研究，詹斯基建造了专门的天线和接收器，接收器的工作波长是 14.6



图 2.7 射电天文学的创始人詹斯基 (Karl Jansky)

米（见图2.8）。在研究过程中，他发现一种根源不明的“嘶嘶”型的天电，并发现它的方向似乎同太阳相关。本来，詹斯基的工作可以到此为止，因为影响通信的主要干扰都已查明，而这种嘶嘶型的噪声对实际的无线电通信又几乎没有什么影响。通信工程师又何必去为它操心呢？

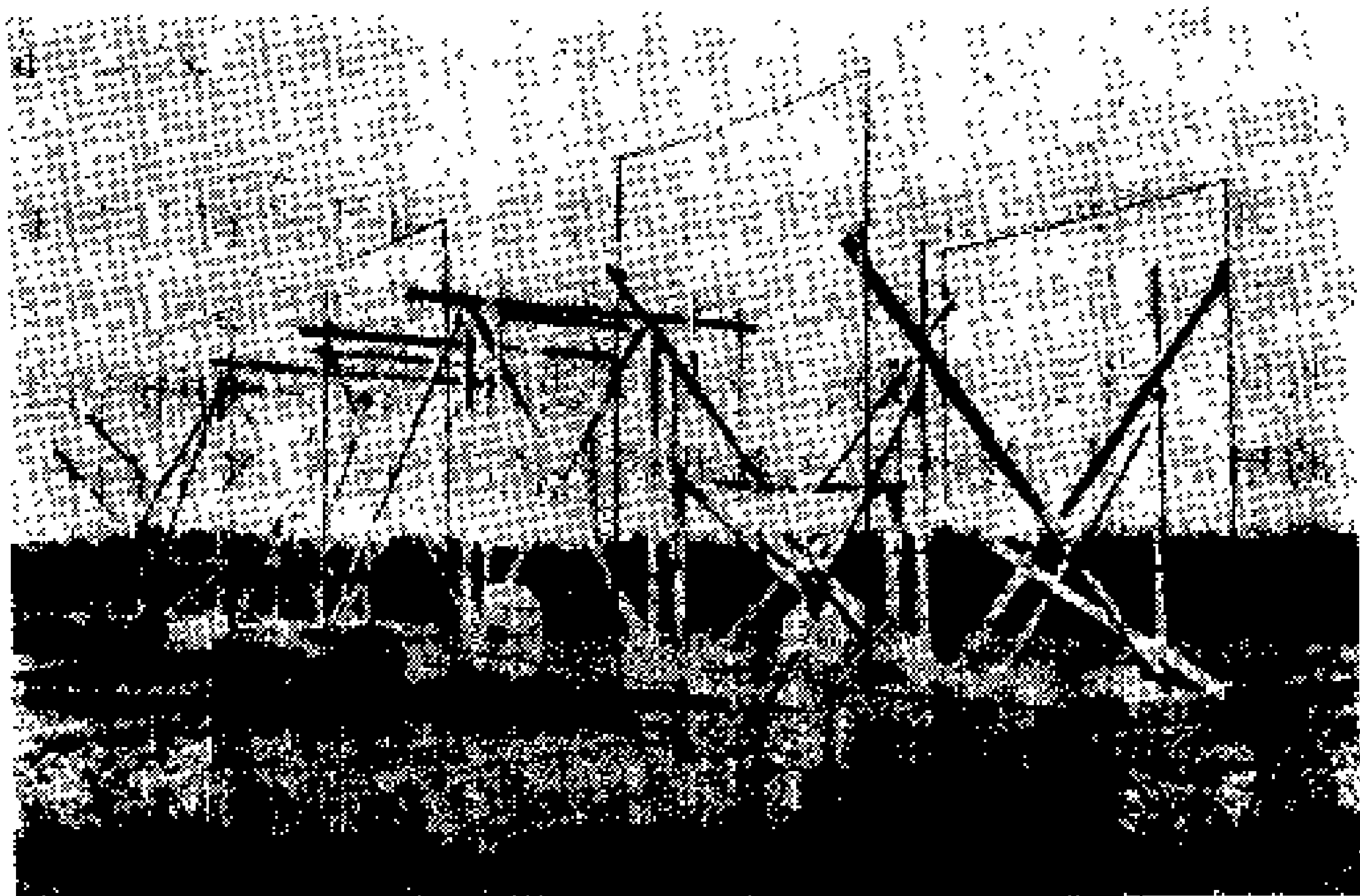


图2.8　詹斯基发现来自地球外的无线电波的天线

但詹斯基没有放过这微弱的电波，他继续积累资料，发现它并不完全同太阳运动相一致，而是每天都要提前4分钟。詹斯基有一位好朋友，名叫斯盖莱特，他也是贝尔实验室的无线电工程师，但他还在附近的普林斯顿大学攻读天文学的博士学位。同时从事这两种不相关的研究在当时看来是很奇怪的。詹斯基在同他的交往中，学到了一些天文学的基础知识，尤其是知道了恒星时的周期比太阳时要短4分钟。因此詹斯基认识到，嘶嘶的噪声可能是随恒星时变的，即来自太阳系外的固定地点。经过一年的监测，詹斯基断定了这一点是对的，并给出了这个固定源在天球上的坐标，指出它的方向与银河

系中心相近。

于是，人类第一次揭开了来自太空的无线电波的秘密，射电天文学从此诞生，这是天文学史上的又一次大革命。人类观测天空，不管是用肉眼还是望远镜，都是在整个电磁波的可见光波段上进行的，这是人类认识宇宙的第一个窗口。现在无线电波段的窗口打开了，丰富的信息扑面而来，天文学的新时期到来了。

光学望远镜用玻璃透镜来收集透过可见光窗口的电磁波，而透过射电窗口的无线电波，则是用射电望远镜的天线来接收的。当无线电波传播经过天线时，便在天线中产生极微弱的电流。与天线相联的接收设备检测到这种微小的变化，且把它的强度放大一百万倍以上。于是我们就能测量和记录



图 2.9　美国国家射电天文台(设在弗吉尼亚州绿岸)的 300 英尺射电望远镜，是世界上第二个最大的可动抛物面望远镜

这种信号了。射电望远镜的天线一般做成抛物反射面，它或者用金属板拼成，或者用金属线织成网状。由于不象光学望远镜那么精细，所以可以做得很大（见图2.9）。现在世界上可转动的单个射电望远镜的冠军（图2.10）在西德波恩，它的抛物面直径达100米左右。

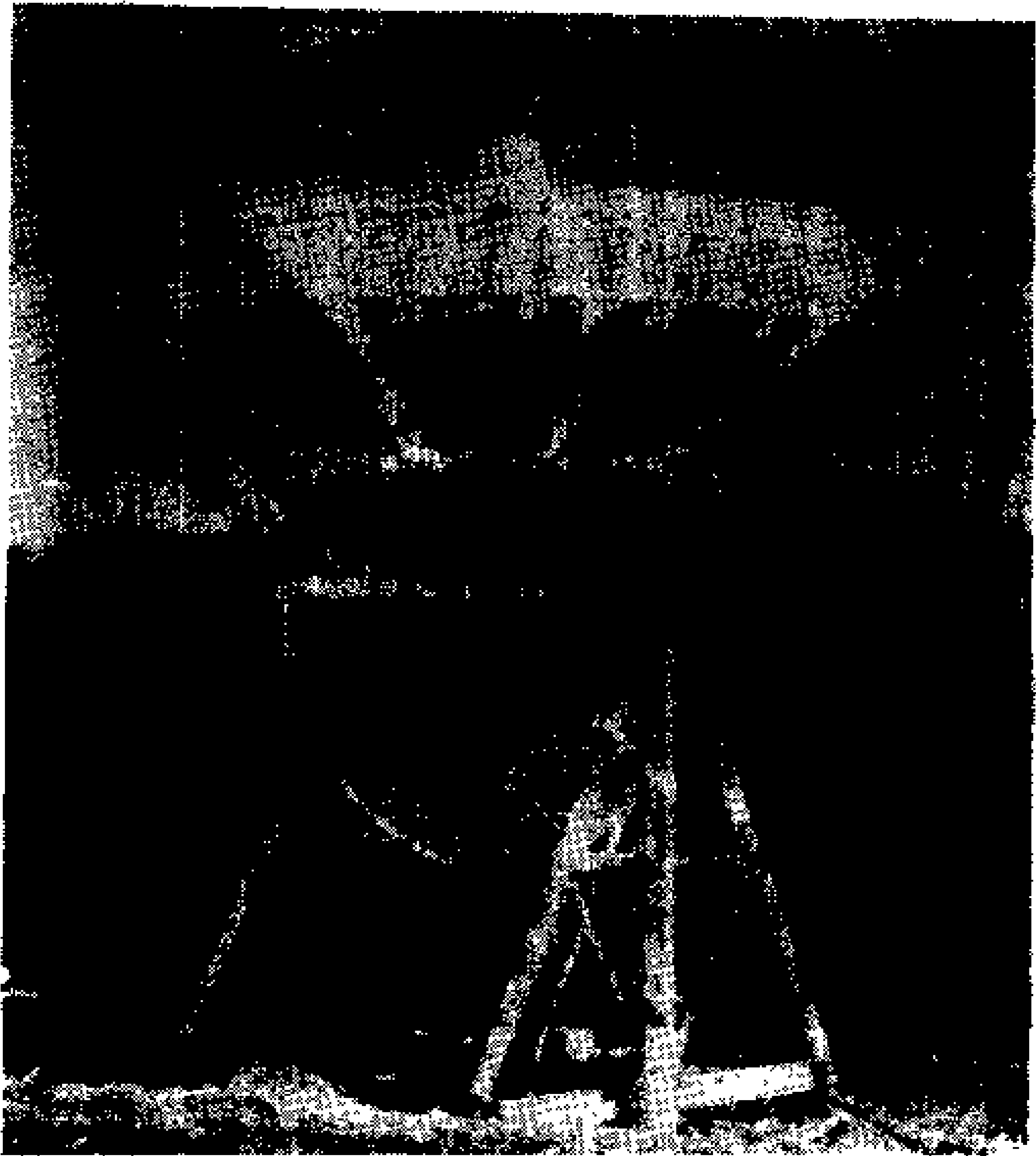


图2.10　西德波恩的100米口径的目前世界上最大的可动抛物面射电望远镜

然而世界上最大口径的射电望远镜是固定在地球上的，利用地球的转动来改变指向。它的球形反射面直径为300多



图 2.11　波多黎各阿雷西博的射电望远镜

米，安置在波多黎各的阿雷西博一个天然形成的山间盆地中(见图 2.11)。它的天线接收器有 600 吨重，高悬在 50 层楼那么高的空中。球形反射面原是彼此相距一厘米多的钢丝织成的网。1974 年，为了让这架望远镜适于在较短的波段工作，改用铝板铺成。它的接收器用三根将近 4 厘米粗的钢索悬挂

在盆地边缘的三座混凝土高塔上，通过自动的控制设备，高度可调到3毫米的精度以内。这架望远镜还配备了雷达系统，可以兼作雷达之用。这架望远镜处在低纬度区，对于寻找星际空间的各种分子以及微弱、遥远的射电源具有特别巨大的威力。由于又可作雷达使用，它还可以用来绘制金星、水星、火星、木星和土星的卫星的雷达图。例如它绘制的金星雷达图可分辨出金星上1公里大的区域和100米的高度变化。有趣的是，利用它的雷达系统，科学家们在1974年11月16日向一个叫做M13的星系发出了一系列信号，信号用其它理智生命也应当看得懂的形式传达了我们地球和太阳系、地球上的人类和它的遗传密码以及阿雷西博望远镜本身的信息。因此，这架巨型的雷达兼望远镜不仅是我们收集来自宇宙的电波的“听筒”，还是我们向别的世界的文明通话的第一个“话筒”。

但是阿雷西博望远镜威力虽大，却是不能随意转动的，不能用来指向任意想研究的射电源。只有当它跟随地球转动而扫过这个源时才能研究；况且，有的源它不能扫到。所以这个美中不足之处还要通过可转动的望远镜来补充。可是能动的望远镜要做得很庞大，就会遇到许多困难；大到一定程度，就简直成为不可能。在五十年代末、六十年代初发展起来的孔径综合技术从这种困境中找到了一条出路。让我们设想将一个抛物面划分成许多个小单元。整个抛物面天线收到的信号可以看作是这些小单元中任意两个结成的对子所产生的信号的一种组合。如果抛物面其余部分除去，只剩下两个单元，那么可以连续改变二者的相对位置来进行测量；将测量结果综合起来，便可得到整个抛物面的同样效果。这就是孔径综合技术的基本思想(图2.12)。在实际中，我们可以用两个口

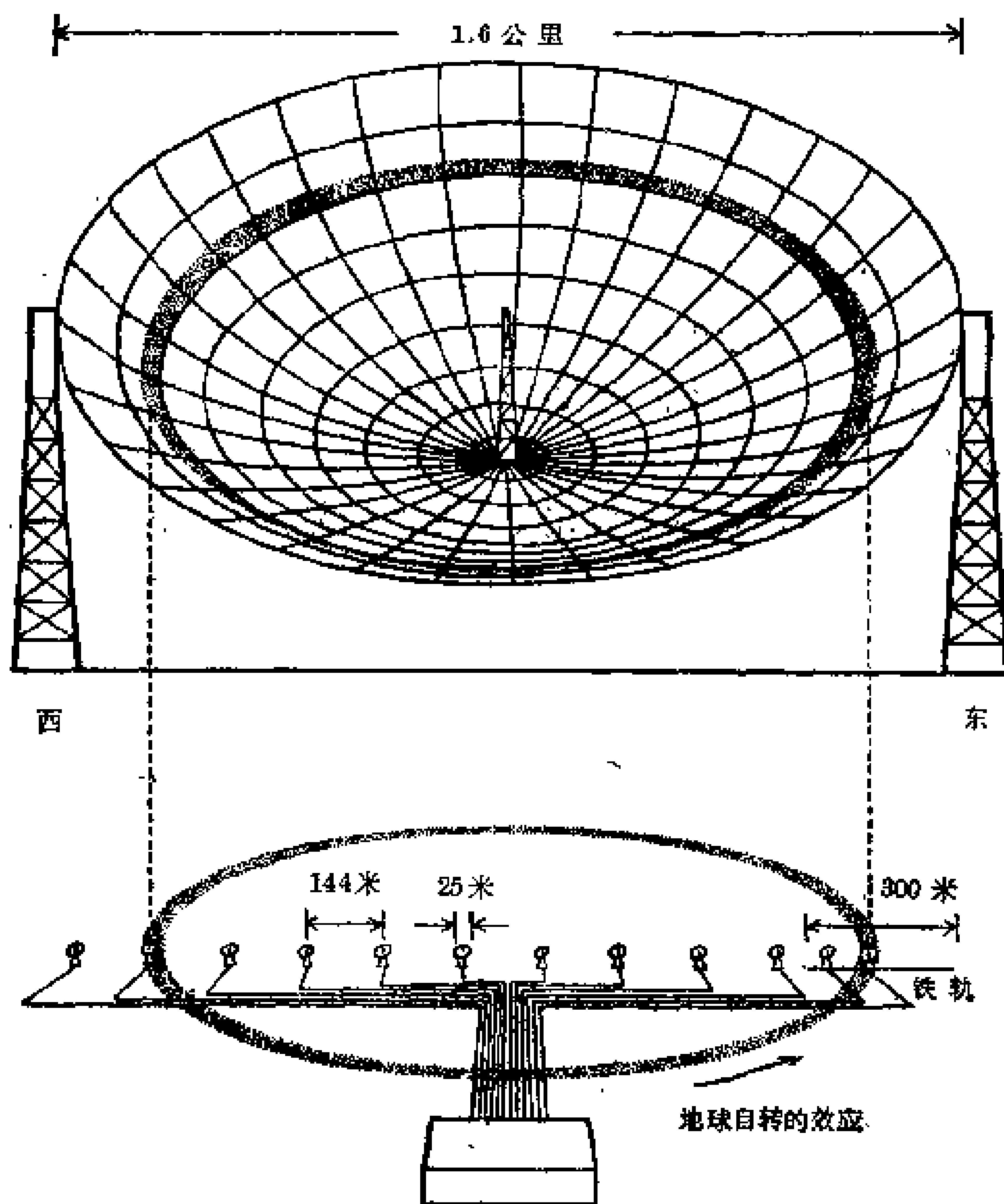


图 2.12 孔径综合技术示意图，若干个小尺寸的射电望远镜的信号经过综合可代替一个巨大的望远镜的作用

径较小的望远镜作为“单元”，移动其中一个，进行多次测量，便可获得一个大口径望远镜的结果。美国新墨西哥州海拔2千多米的高原上正在建造的甚大天线阵（VLA）就是按这样的思想设计的。为了节约时间，这个天线阵不是用两个抛物面天线，而是用27个抛物面分布在Y形的三个臂上。三



图 2.13 接近完工的甚大天线阵

个臂长各 21 公里及 19 公里。铺设双线铁轨，200 吨重的天线可在铁轨上移动，运送到所要的观测位置(见图 2.13)。整个天线阵用计算机指挥运转，每个天线接收到的信号也送到电子计算机进行综合处理。这个天线阵建成后，预计灵敏度可达到 10^{-30} 瓦/米^2·赫，在波长 1.3 厘米处的分辨力为 0.1 弧秒。其性能相当于一个直径 27 公里的抛物面。如果要建造一个直径 27 公里的抛物面是完全不可能的，而 VLA 的每个天线直径只有 25 米。



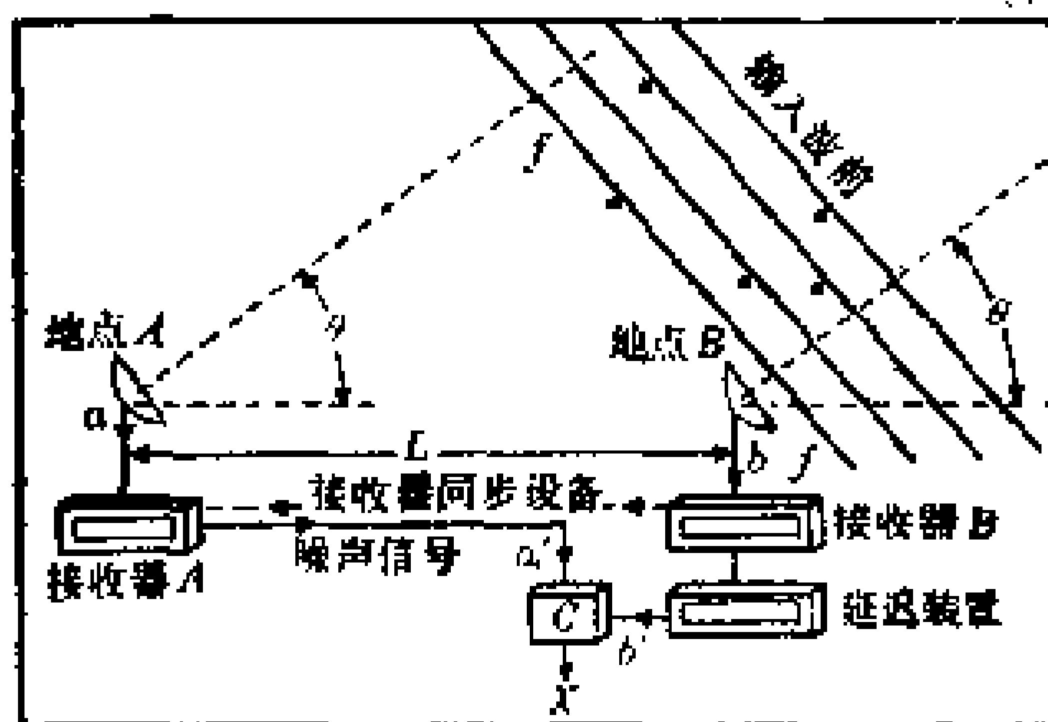


图 2.14 长基线干涉仪原理图

为了解决远距离天体的定位和提高角分辨能力的问题，现在天文学工作者还使用了长基线干涉仪。这就是两个相距很远的射电望远镜同时观测某个天体，将得到的信号一起分析(见图 2.14)。利用高超的分析技术和极精确的定时，已取得了可喜的结果。目前用横跨大陆甚至不同大洲之间的长距离为基线，已获得了万分之几弧秒的分辨能力。

冲破大气圈 走向全波段

我们居住的地球，被一层厚厚的蓝色"面纱"——大气层覆盖着。这个大气层给我们提供了充足的氧气、适宜的温度，它保护人类免受宇宙空间飞来的不速之客，如流星、粒子辐射等等的袭击。但也就是这层"面纱"吸收了大部分波长的电磁波，妨碍了我们对宇宙的探索和认识。前面已经看到，地球上的人们只能通过两个窗口来观测宇宙，那就是光学窗和射电窗。但是电磁波包括从无线电波到γ射线的各种波长的辐射。在这长长的电磁波谱上，光学窗和射电窗只是两个不大的部分。在这两者之间，波长从若干毫米到千分之一毫米，是红外和微波区。此范围内的电磁波受到大气中各种成分，尤其是水蒸汽的严重吸收，所以很难为地球上的仪器所接收到。同样，在可见光的紫端以外，随着波长越来越短，分别是紫外辐射、X 射线和γ射线的区域。它们受到大气中臭氧等其它成分的强烈吸收(见图 2.15)。因此，我们人类世代以来都只是通过一个很狭窄的窗口了解宇宙，直到近几十年中，才打开了第二个窗口。射电窗口给我们送来了许多闻所未闻的新信息。这自然也促使人们去打开所有的电磁辐射窗口。五十年代末，空间技术的进步以及其它一些技术的进展使这个愿望开始得到实现，于是，天文学进入了全波天文学的崭新时期。

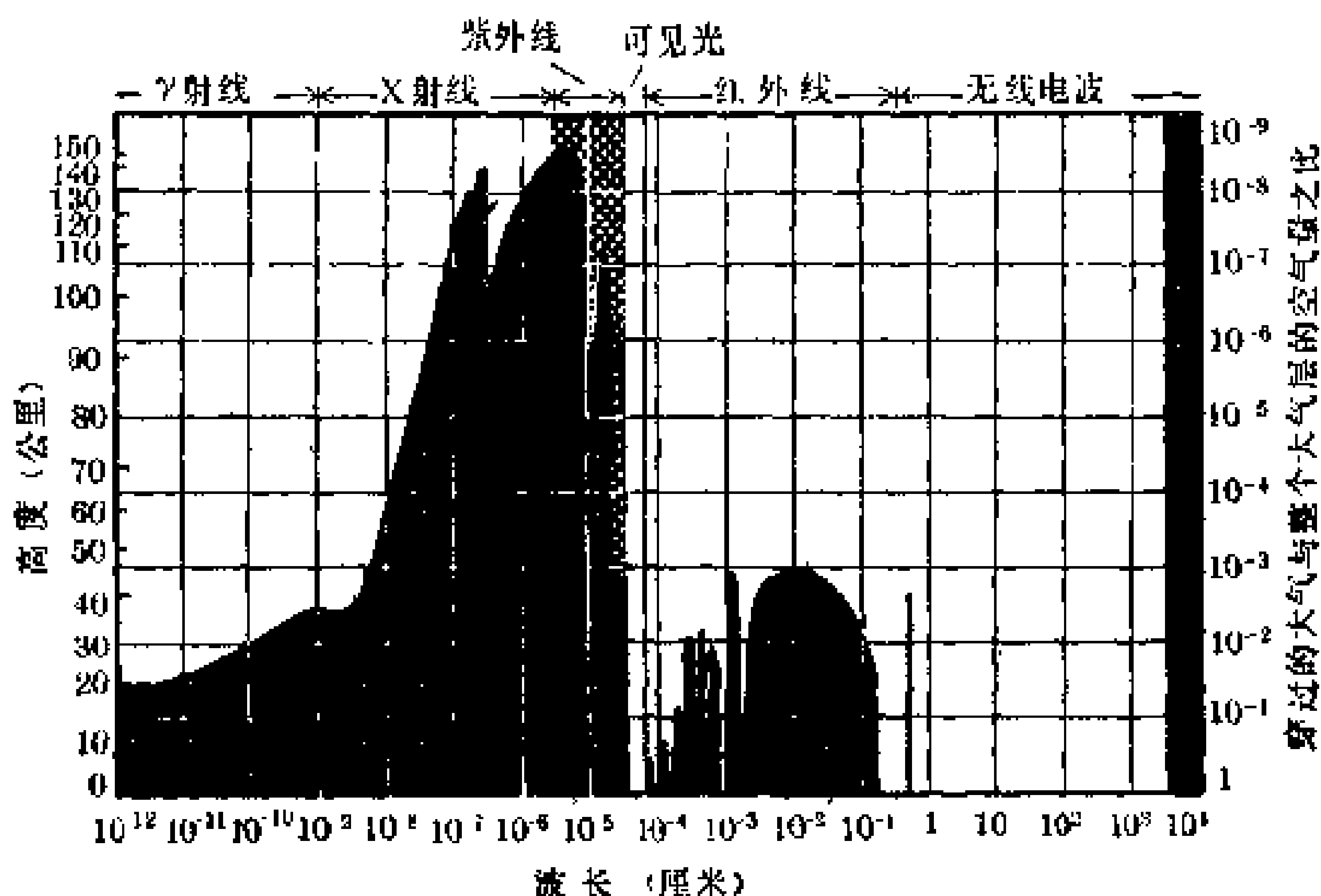


图 2.15　大气对电磁波的吸收，阴影部分的边界表示辐射强度降低到原来一半的那个高度

红外天文学、紫外天文学、X 射线天文学和 γ 射线天文学相继应运而生，在人类面前展现了一幅更加绚丽多彩的大宇宙图景。

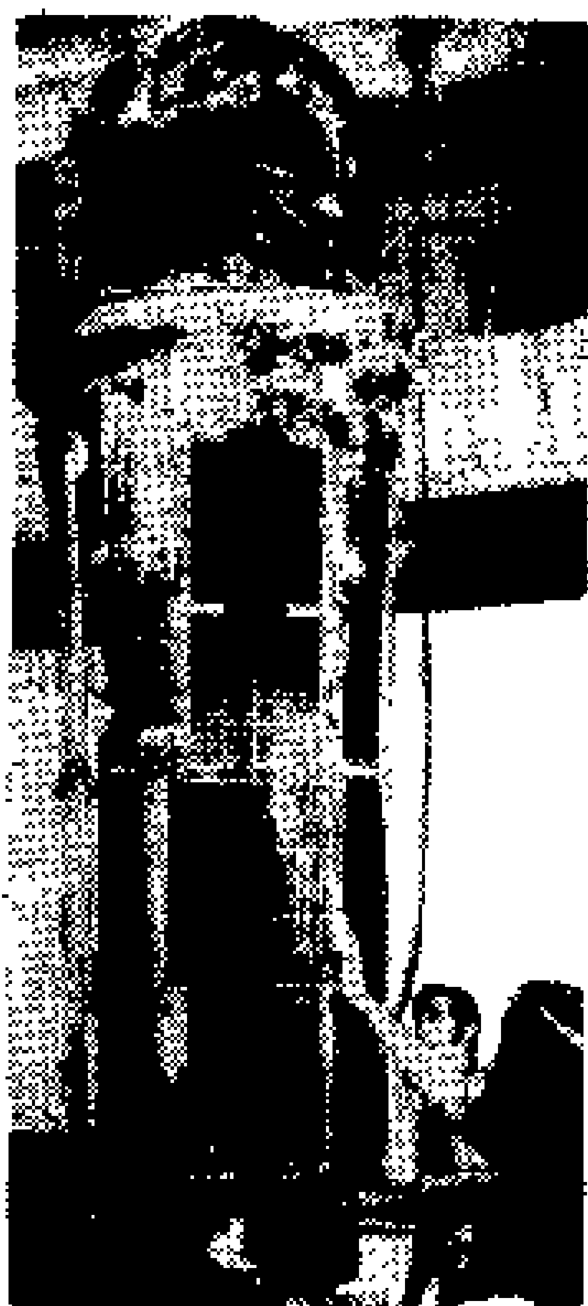
红外线虽然比无线电波发现得更早，但因为它大部分受到大气的吸收，又没有合适的检测器，所以这个红外窗口到六十年代才算真正打开。六十年代初出现了液氦致冷的红外探测器，从此红外天文学的工作便在地面和高空以及外层空间全面展开了。在绝对温度四千度以下的天体主要在红外线波段发射，因此它们是红外天文观测的主要对象。这些天体包括：太阳系中的行星、卫星和彗星等天体；正从星际云中凝聚成恒星的"星胚"，它们还没有热到足以发光的程度；还有那种核燃烧已经熄灭，温度已经降低的极晚期的恒星。因此红外线可以为我们提供关于恒星的出生和死亡的宝贵知识。虽然

这两个阶段同恒星稳定的阶段相比是比较短暂的，但还是有着许多新现象、新规律，是现代天体物理的重要课题。而且红外线还不易被星际尘埃颗粒吸收，因此在银河系中心方向上尽管有大量尘埃挡住了可见光，但银河系中心是很强的红外源，我们可以通过红外观测来了解它。事实上，这种观测确实给我们提供了许多重要的知识。在银河系之外，类星体和许多星系核也能强烈发射红外线；星际有机分子的许多谱线也处于红外波段。所以，目前科学家除了用装在气球、火箭上的红外探测器观测天空以外，近年还在高山顶上建立了大型的红外望远镜。如在美国的夏威夷岛的海拔四千多米的火山顶上，建立了口径3米和3.8米的望远镜来进行红外波段的观测。有的正在计划用航天飞机把红外望远镜送上天。美国和荷兰正在联合研制红外天文卫星，预计在1981年发射。卫星上的望远镜用铍作镜面，在接近绝对零度的超低温下工作。这颗卫星将使红外天文学进入一个新阶段。

发射紫外线的天体同发射红外线的天体恰好相反。它们主要是温度极高，极明亮的年轻的恒星。表面温度在一万度(在这里和以下都采用绝对温标)到五万度之间。例如，温度在一万度以上的恒星的辐射很大一部分是在波长为3000埃(1埃$=10^{-8}$厘米)以下的紫外区发射的。二万度以上的恒星几乎全部辐射都在紫外波段。紫外线受大气吸收最为严重，因此紫外观测必须利用探空火箭和卫星上的仪器。紫外波段的观测对于星际介质的研究也很重要。我们在可见光波段只能看到钠和钙的吸收线，而星际空间中含量最多的氢、氦以及氧、碳、氮等都在紫外波段有最强的吸收线。所以六十年代末以来，科学家把紫外线观测设备装在火箭上，或者装在阿波罗飞船、天空实验室等一些卫星上。这些装置在紫外波段作出

了许多重要的发现。尤其是第三颗轨道天文台卫星(OAO)是专门用来进行紫外区的观测的，它在1972年8月发射，当年是哥白尼五百周年诞辰，因此被命名为哥白尼卫星。它成功地测量了原子氢和分子氢、原子氧、中性碳、电离硅等在银河系空间的分布、速度和温度。例如哥白尼卫星发现，有些星际低密度云的温度达一万到十万度；并发现在大范围里有飘纱状的物质云，它们可能是超新星爆发所形成的，也可能是恒星风的冲击波形成的。这些资料为研究星际介质的成分，物理性质以及演化提供了重要的依据。

然而，六十年代以来，最激动人心的发现还要算是在X射线天文学的领域内。X射线的波长在0.1埃到100埃之间。1962年，美国用火箭把X射线探测器送到225公里的高空，探测到天蝎座方向上有强大的X射线源，强度比原来预计的要大100倍，当时以为是许多源发射的总和。接着定位精度更高的仪器发现它是一个点状源，这就是人们发现的第一个X射线源天蝎座X-1。1966年，光学天文学家证明天蝎座X-1也发可见光，是一颗13等的变星，离我们约1千光年。根据这样的数据，得出它的X射线发射比光发射的能量大1千倍。这就更使天文学家吃惊了。此后的几年中，天文学家用火箭又发现了几十个源，还发现了连续的X射线背景。为了对X射线进行长时间的观测，以弄清这些X射线源的本质，1970年12月12日，在肯尼亚东海岸外的印度洋上，发射了美国制造的第一颗X射线天文卫星。那一天正是肯尼亚独立日，所以用斯瓦希利语“自由”一词——“乌呼鲁”来命名这颗卫星(图2.16)。乌呼鲁的工作是非常成功的。它最初70天就把所发现的X射线源的数目增加到125个。这些X射线源有些是银河系内的，有些是银河系外的。在乌呼



鲁和后来的一系列X射线天文卫星所发现的X射线源中，大量的还没查明其本质。但就从那些少数的“身份已明”的X射线源来看，就已经可以得出结论：这些X射线源都是十分新奇的天体。例如乌呼鲁的重要贡献之一是发现了X射线双星系统。根据观测，它们都是十分致密的小天体，但X射线的强度却可以比太阳的总能量输出强度还高一万倍。现在普遍认为，在这种双星系中，物质不断从另一颗星流向有强大引力场的致密小天体，以X射线的形式释放出巨大的能量。这些X射线双星有一类有着规则的快速脉冲，同六十年代后期发现的射电脉冲星类似，似乎可以断定双星系中的小天体

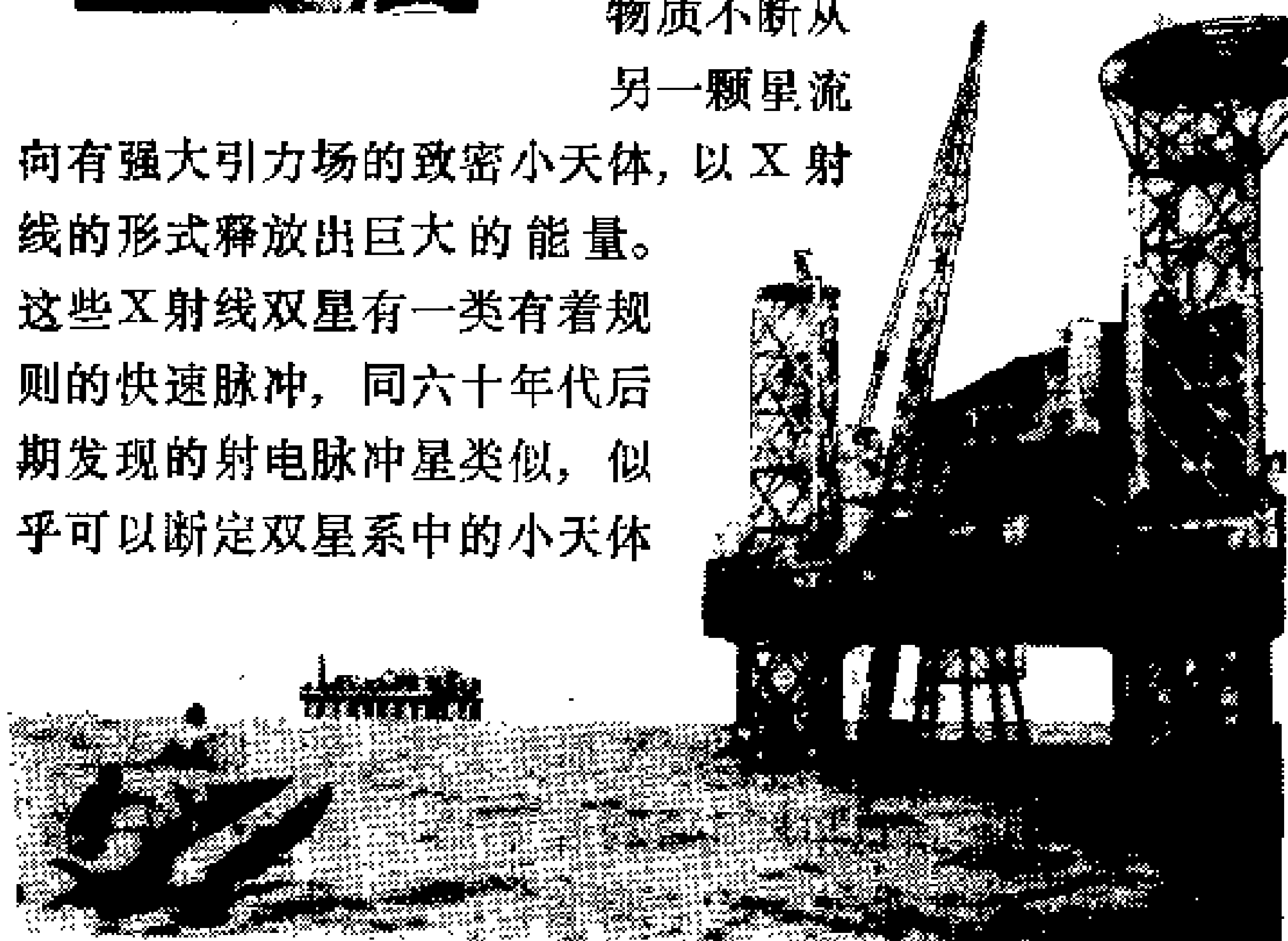


图 2.16　乌呼鲁卫星(SAS-1，太阳电池板尚未张开)及其在肯尼亚海岸的发射台

是一个中子星。另一些则呈现出不规则的迅速变化，尤其是天鹅座 X-1，根据它的质量看来不可能是中子星，所以许多天文学家认为其中的致密天体是一个更为奇特的东西——黑洞。因此，毫不奇怪，X 射线天文学成了现代天文学中最活跃、最前沿的领域。

γ 射线是波长比 X 射线还要短的电磁辐射。宇宙中许多过程都能产生 γ 射线。例如宇宙线粒子同星际介质发生相互作用，宇宙中重元素核的合成反应等都能产生 γ 射线，因此宇宙线和元素合成的研究可以从 γ 射线的观测中得到许多重要的情报。观测发现，有些脉冲星和 X 射线源也是重要的 γ 射线源，它们是如何发射 γ 射线的，目前还停留在理论上的假设。近年来最使人感兴趣的发现是所谓“γ 射线暴”。这种现象变化短暂、剧烈，能量却很高，证明是体积很小的天体发出的。它们的来历还是一个谜。不过已经可以看出，γ 射线和

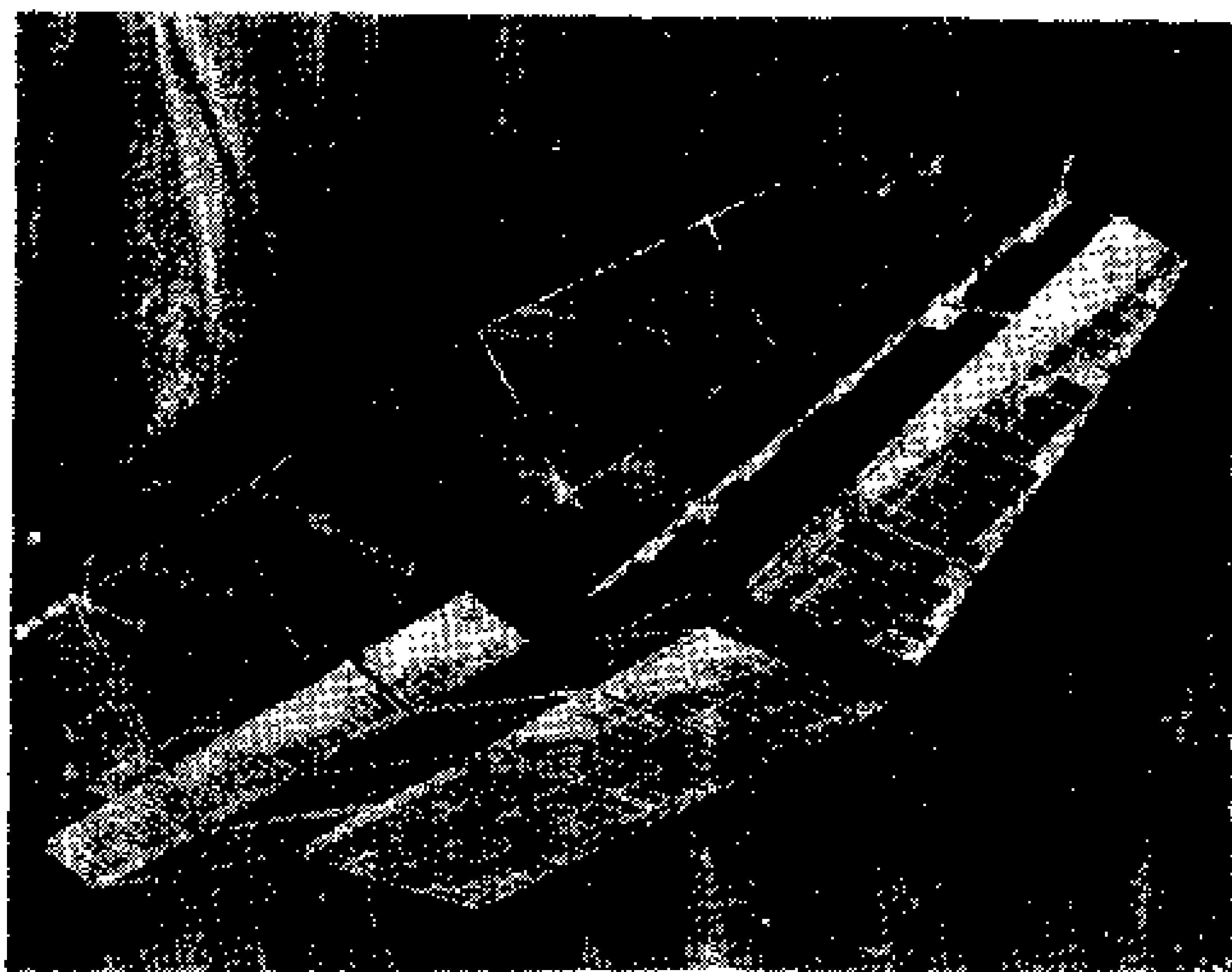


图 2.17　高能天文卫星(HEAO-B) 重约三吨

X 射线一样，都是体积小、能量高的物理过程的产物。近年发射的几颗高能天文卫星 (HEAO) 主要就是从事 X 射线和 γ 射线波段的观测(图 2.17)。

新的孕育

能够从宇宙空间给我们带来信息不仅是各种波长的电磁波，而且还有各种微观粒子。例如宇宙线就是来自宇宙的带电粒子流，包括质子、电子以及 α 粒子等，它们能带来宇宙的信息，我们将在专门的章节中来介绍。除此之外，还有一种长期没有受到重视的粒子——中微子，它同光子一样是不带电荷的，没有静止质量，在真空中以光速运动。但这种粒子与所有的物质都只有很微弱的相互作用，所以能够不受电场、磁场的偏转穿过广阔的宇宙空间，甚至能自由地穿透一般的天体。所以中微子可以把情报传送到遥远的地方，甚至可以把星体内部的真实情况及时传送出来。但也正因为中微子有这样巨大的穿透能力，我们还没有什么有效的探测方法来“捕捉”它们。这是中微子天文学不能成熟的主要原因。

然而，宇宙中有许多过程都会产生中微子流，例如恒星内部的核反应过程就能产生中微子。太阳是最近的一颗恒星，探测中微子的努力自然首先以它为对象。然而这方面的工作得出了出乎理论预言的结果，成为有名的“中微子失踪案”。我们将在第四章内专门加以讨论。超新星爆发也能产生大量中微子，据估计，爆发中发射中微子的功率比发射光的功率还大。它们带走了恒星坍缩时释放的大量能量，在超新星的爆发中起着重要的作用。因此，科学家打算在五千米深的海底安放体积庞大的海水容器来探测宇宙中微子。随着物理学和天文学的进步，中微子天文学将克服它在探测技术方面的

障碍，使中微子成为天体物理学的一个重要工具。

中微子以外，天体物理学家还在考虑用引力波来探测天体。引力波是爱因斯坦的广义相对论所预言的一种辐射。正如加速运动的电荷能产生电磁波一样，作不对称加速运动的物体能以光速发射引力波。但到目前为止，这还只有间接的证据，而没有直接测到。

现在知道，当恒星进入晚年时，往往会成为体积极小、密度极高的天体，这些天体的运动变化有明显的广义相对论效应。它们的引力场很强，它们的活动将伴随引力波的发射。理论上预计，能显著产生引力波的过程包括：大质量天体的碰撞、振动和脉动等；星系核或恒星的坍缩；黑洞的爆发、碰撞等等。如果真的能测到这些过程发出的引力波，那不仅可以据此了解引力波源的性质，而且也是对广义相对论的一项最重要结论的验证。但是由于实验极为困难，从前没有人认真考虑过这个问题。五十年代末，美国马里兰大学的物理学家韦伯(J.Weber)开始致力于这项工作。大体上说，他测定引力波的“天线”就是一个重一吨的铝柱体。垂直于柱体轴的引力辐射会造成柱体两端间距离的变化。这种变化可以用超精密的压电应变仪测得。韦伯在马里兰大学和1000公里以外的芝加哥附近放置了两个这样的天线同时进行测量。1969年他宣称得到了十七个两天线同时受激发的事例。韦伯根据统计学指出，这种同时激发不能完全归因于偶然的巧合，而说明两个天线是受到同一原因激发的。他分析了各种能在如此大距离上引起同时激发的原因，并将它们一一排除，最后只有引力辐射可以解释这个现象。韦伯的结果轰动了物理学界，几十个研究组竞相重复韦伯的实验，但没有得出肯定的结果。因此人们倾向于认为韦伯的结果并不是真的引力辐射效应，而是某种

不明的原因造成的。

韦伯的直接检测引力波的尝试虽然没有成功，但引力波的验证却在另一个方向上取得了进展。1978年，美国射电天文学家泰勒(J. H. Taylor)等人经过四年的努力，以射电脉冲双星PSR 1913+16为对象进行了上千次观测，发现双星周期有微小变化。这种变化如果解释为是由双星辐射引力波所引起的，那么理论上的计算值与实测值相符。这可以说是对引力波的第一个定量的观测证据。

然而，要使引力波天文学成为电磁波天文学一样的观测科学，仍然必须直接检测到引力波。现在认为，韦伯的装置在原理上是可行的，只是它只能发觉 3×10^{-15} 厘米的变形，这个数字虽然只有原子核直径的三十分之一，但要测量引力波，灵敏度还嫌太低。因此，科学家正在计划建造第二代的引力波天线。有的方案仍然用铝制的柱体，只是重量要大十倍，而且用液氦冷却到绝对温度4度，以便把热噪声的干扰减低到最低限度。这样的第二代天线灵敏度将提高100倍。还有的方案建议用极纯的无位错介电单晶体代替金属制成柱体，或用激光干涉仪来测量位移。科学家们期望，这样的引力波天线将能测到超新星爆发时发出的引力波。人们正在期待着这方面的进展。

从"引力波窗口"看出去，无穷奥秘的宇宙将呈现出一幅什么样的图景呢？这是现在难以预言的。

第三章　空间和时间的尺度

天体系统的空间层次

我们今天常常谈论宇宙航行、宇宙时代等等的字眼。其实这里所说的宇宙只是指地球周围的空间，充其量也只是地球到月亮或其它行星之间的这一部分空间。它同我们在这本书里将要涉及的大宇宙相比，简直就好比万丈高楼的最初一级台阶一样。不过人类虽然生活在这样一个阶梯的最末端，却已经凭借着自己的智慧和双手创造的仪器能够探察到极为遥远的宇宙部分，对如此广瀚的天空区域有了初步认识。

为了漫游这样一个广阔的世界，让我们从自己周围的太阳系谈起吧。太阳系有多大呢？如果以我们所知道的最外层的大行星——冥王星为界，则直径有一百二十亿公里。太阳光从太阳照射到冥王星，路上要耽搁五个半小时。如果用每秒十六、七公里的宇宙火箭到冥王星上去旅行一次，那么要花上十多个年头，来回一次就差不多消耗一个人的半生了！然而这还不是太阳系的边界。我们太阳系除了九大行星以外，还有许多小的成员，如小行星和彗星等。近年来关于彗星的研究告诉我们，在比冥王星轨道大几千倍的地方，可能有许多凝结成固态的水、氨和甲烷等物质组成的“冰块”，它们在极其巨大的轨道上绕太阳运行。这些冰块有的受到邻近恒星的引力干扰，便会掉到太阳系内部来。冰块在接近太阳时，便开始升华或蒸发，在阳光和太阳风的作用下，形成一条长长的明亮的尾巴，这就是我们所看见的彗星。

彗星的母体离太阳比冥王星还远几千倍，太阳光照到那儿要花成年的时间。那个深广寒冷的地方才是太阳系真正的边界，离别的恒星已经不远了。我们最近的邻居——比邻星就在离太阳 4.3 光年的远处。银河系就是由无数个象太阳一样的恒星组成的天体系统，它构成了比行星系更高的一个层次。我们的银河系在宇宙中只算中等，大约有一千多亿个恒星聚集在直径为 10 万光年的一个大圆盘中。如果每个恒星只有硬币那么大的话，那么在一个省那么大的范围内，只有几枚硬币稀稀拉拉的分布在其中，可见我们银河系中恒星分布是多么空旷稀疏。但是从遥远的地方来看，我们的银河系也象别的星系一样，密密麻麻地布满了星斗，形成一片云。我们的太阳就在这片云中很不显眼的地方：离中心三万三千光年。它在这样的距离上以每秒 250 公里的高速带着太阳系的全体成员，默默地绕银河中心奔走。它走一圈，就要二亿五千万年时间。也就是说，在我们人类文明发展的这段时间内，太阳只在其绕银河中心的轨道上走了微不足道的一小段路程。

银河系外还有没有天体呢？在很长一段时间里，许多人认为银河系就是无所不包的宇宙。只有少数学者持不同的看法。早在十八世纪三十年代，就有人推测，类似银河系这样的恒星系统，在宇宙中一定不是唯一的。这种看法后来被进一步发展成为"岛宇宙"假说，该假说认为宇宙中有无数恒星组成的银河系，犹如大海中的无数岛屿一样。德国著名哲学家康德进一步指出，望远镜中看到的某些星云，不是别的，正是这种岛宇宙。受这些思想的启发，法国数学家朗伯尔特(J. H. Lambert)在 1761 年出版的《宇宙论书简》一书中提出，宇宙中的天体形成各种不同等级的系统，它们一级比一级高，直至无穷。在这样一个等级系统中，太阳系是第一级。星系

中的庞大星团是第二级系统。银河系是恒星和星团组成的集合，构成第三级天体系统。许许多多银河系样的星系构成第四级，以上还有第五级，第六级，以至于无穷。

这样一种关于无限宇宙结构的推测，在后来的两个世纪中得到了一定程度的证实，证明它不失为一种光辉的预见。本世纪初，由于大型望远镜的问世，最终确证了河外星系的存在。仙女座中的一个大星云，就是我们银河系的近邻，它比我们的银河系还稍大一些，离地球220万光年（见图3.1）。在三百万光年的方圆内，还有象大、小麦哲仑云一样的二十个较小的星系。它们可能是由引力作用同银河系和仙女座星云联系在一起的，称为本星系群。这样的星系组成的小集体别处也有，例如离我们一千万光年以远的地方，有一个星系M81，它的周围也集合着一群星系，构成了同我们本星系群相邻的另一个星系群。在星系群的等级以上，还有更高等级的天体集团。在离地球约五千万光年的距离上，在室女座方向，有一

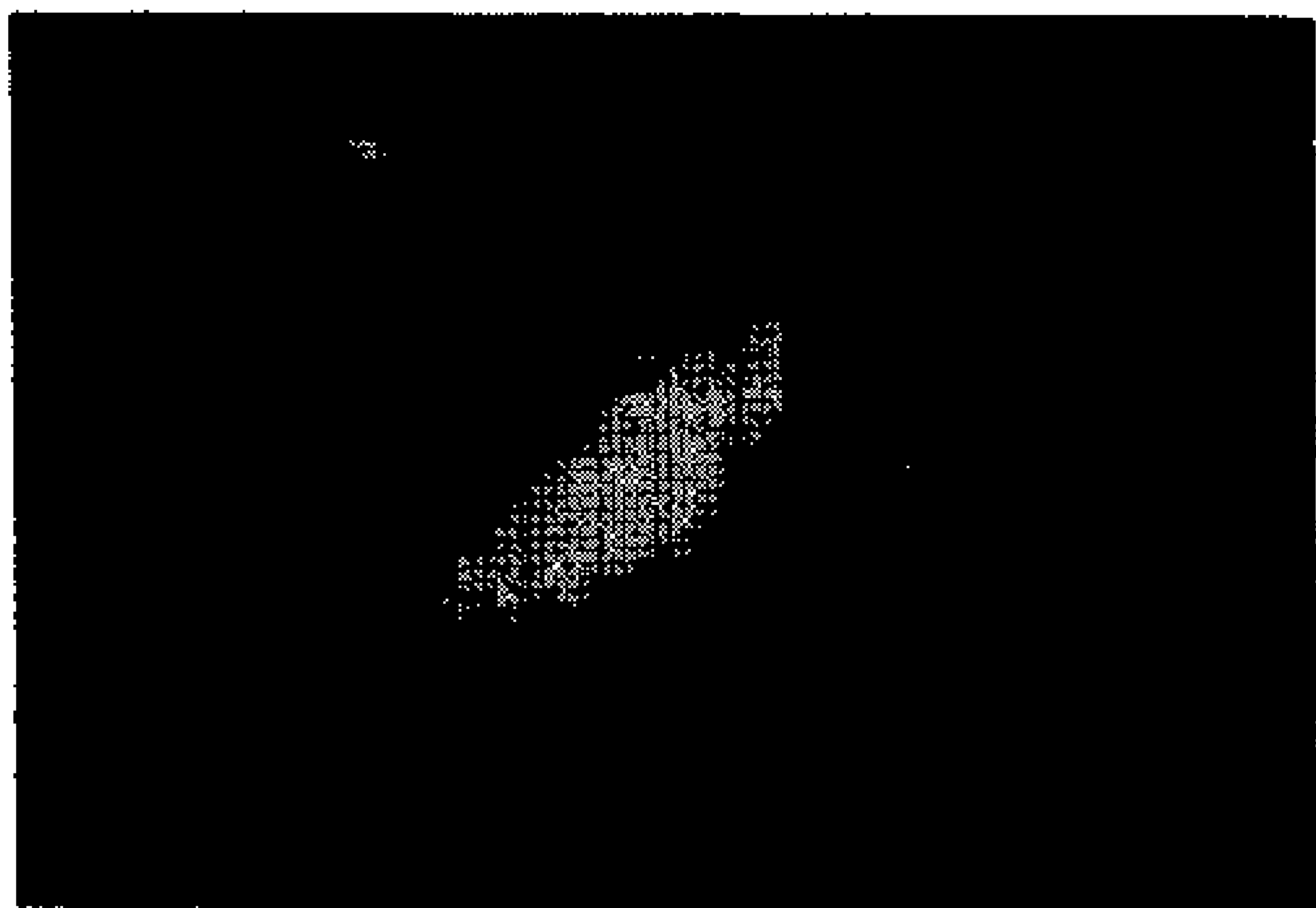


图3.1　最近的旋涡星系——仙女座大星云

个星系密集的庞大集团。它的稠密的星系云一直延伸到我们这个天空区域。所以在那边一个遥远的观察者看来，我们的星系以及它所属的星系群，都属于一个更庞大的星系集团，不过我们是在这个大星系团的边缘区域。这整个庞大的集团，直径为几千万光年，称为本超星系团。

巨大的超星系团是通过对天空的星系分布图进行分析而发现的。天文学家首先通过长期耐心的观测和照相，在天空上标出某个亮度以上的星系的位置。根据对北半球的星系的登记，13等亮度以上的星系有500个，在这样的星系分布图上，本超星系团形成一条带子，从最密集的室女座方向延伸过来(图3.2)。更强大的望远镜可以发现亮度更低的星系，一般来说，它们的距离也更远。例如15等以上的星系在北半天球有5000个，19等以上的星系则比这要多一百倍左右。在这样的星系图上，可以发现后发座方向有一个巨大的星系团，它在三亿多光年的远处，包含的星系比我们本超星系团还要多10倍(见图3.3)，这一类星系团据统计已发现了三千个。随着登记的星系越来越多，在星系分布图上就越来越难以发现星系结成团的现象。这并不一定就是星系不

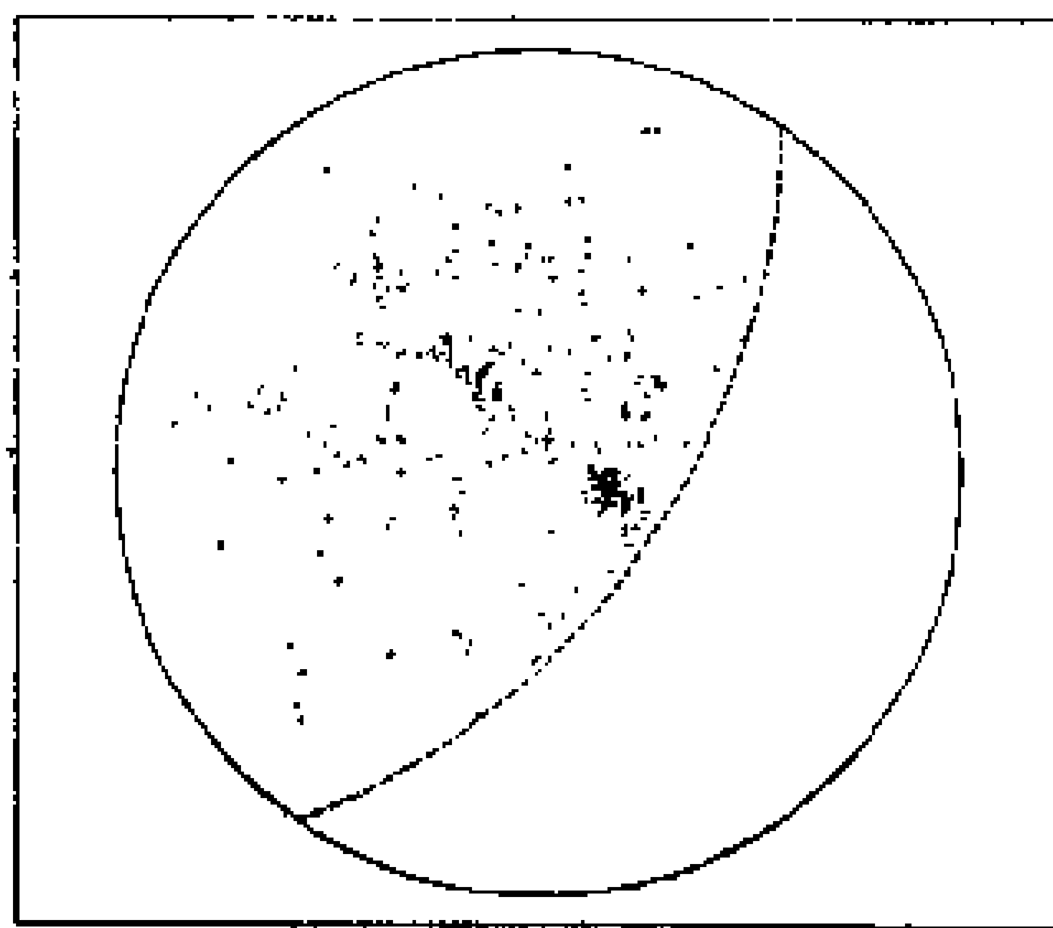


图3.2 北半天球上亮度为13等以上的星系分布图。每个点代表一个星系，共计约500个，中心附近的密集星云是室女星系团，向左上方延伸的较密集的带构成本超新系团

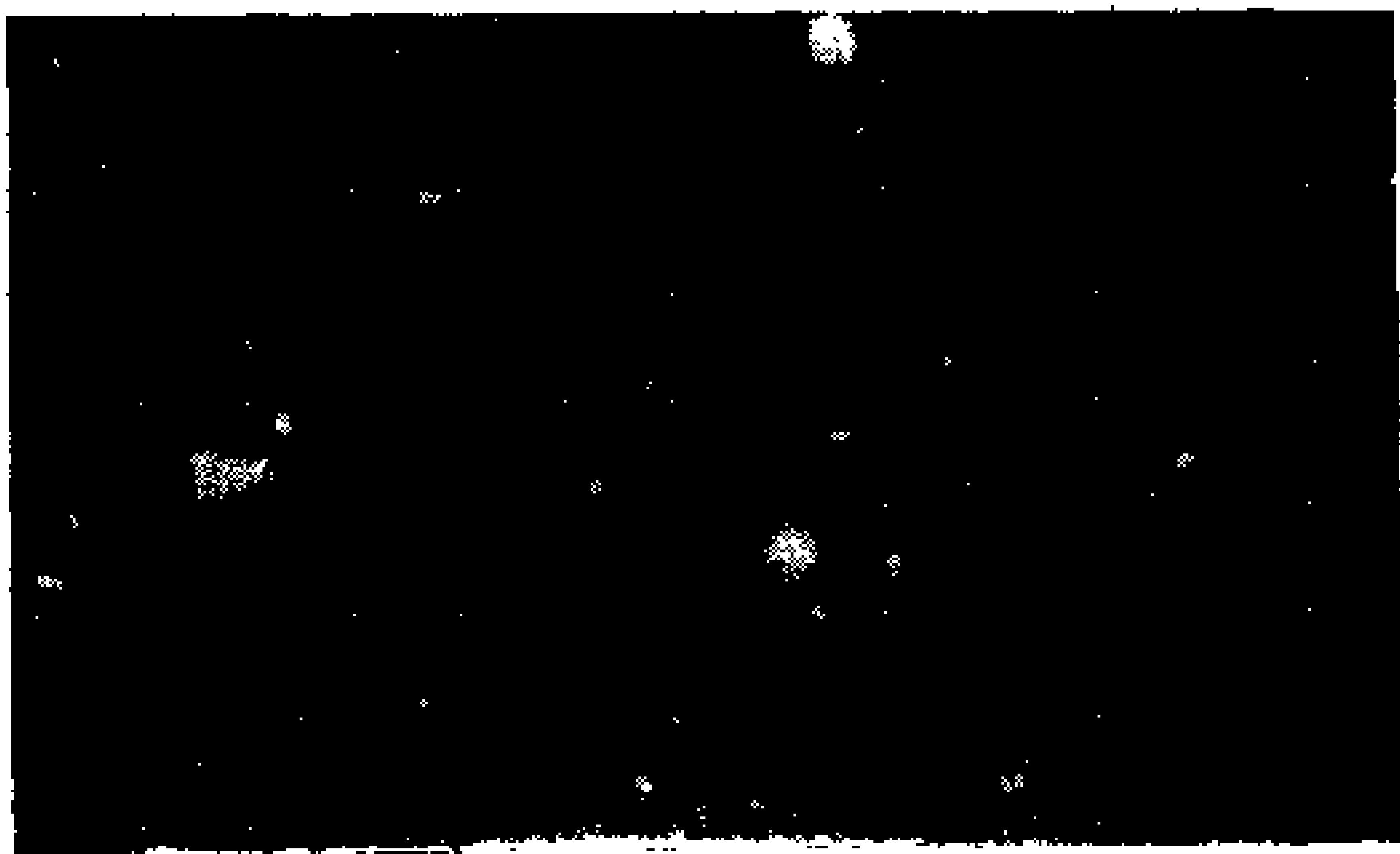


图 3.3 后发座星系团照片

再成团的证明，因为可能有许多星系团远近不一而在星系图上互相重迭，以致掩盖了成团的现象。不过借助于统计数学的方法，近来的分析似乎表明，星系聚集成各种等级的星系团这种趋势到了六千万光年以上的尺度就减弱了。也就是说，小的星系群，星系团是很普遍的，但尺度在六千万光年以上的超星系团就不那么容易形成了。

当然上述的研究结果还只是初步的，有的天文学家还在探索星系在更大尺度上成团的可能性和寻找它的证据。朗伯尔特在二百多年前关于宇宙的无限等级化的思想能不能得到最后证实呢？我们觉得，这种等级式宇宙的图象在一定程度上符合自然界分为许多层次的客观事实，所以在近一、二百年来，得到了越来越多的证实。但是它的等级化未免过于机械和单调，似乎宇宙只是在越来越大的尺度上简单重复同一种模式，这就排除了自然界在各个层次上质的多样性。人类在探索微观世界的过程中，已经发现自然界的每个层次都会出现本质上不同的新现象。例如在原子的层次上，电子是在电

磁力的作用下绕核运动的；在原子核的层次上，中子和质子的结合则是受核力的支配的。电磁力和核力是有着质的不同的，它们遵循不同的规律，各自有不同的范围。当我们在向着越来越广大的宇宙空间探索时，同样也不能认为自然界只会机械地循环和重复。所以天体系统等级的中止，无论在目前所观测到的尺度上还是在更大的尺度上都是毫不奇怪的。事实上，我们将在后面谈到，近年来天体物理学的发现，已经提供了一些宇宙的大尺度特征，它们是小范围的天体系统所没有的，也许它们带来的就是宇宙在更高层次上的信息。

天体的年龄和时标

了解了每个层次的天体形态及其运动特点之后，自然会提出这样的问题：这些天体是哪里来的呢？它们的运动是怎么开始的呢？例如，我们的地球，各个行星是哪里来的呢？它们环绕太阳的运动是怎么开始的呢？进一步又可以问，当初变成地球和行星的那些原始天体又是哪里来的呢？可以想见，这个问题需要同太阳以及银河系中物质的运动一起考虑才能解决。于是又会问，银河系是怎么起源的呢？如此层层深入，我们会提出一连串的问题，最后会问：我们所观察到的这部分宇宙又是从哪里演化来的呢？为了弄清这些复杂的问题，天体物理学要作的第一项工作就是确定各种天体的年龄。

历史学家一般只研究人类文明的历史，把人类在史前的发展和人类的起源让给考古学家和古人类学家去研究。再往远古，便是古生物学家和地质学家的研究对象。地质学家探查地球上岩层和矿藏的生成和运动，把时间追溯到岩石从熔融的岩浆中冷凝出来的时候。天体物理学家查明天体年龄的工作就是从这里开始的。

现代地球科学告诉我们，地球表面的地壳处在不断的运动和更新之中。地球深处不断有岩浆上升到地面而凝结成岩石，地表的岩石又重新下降到地球深处而熔化。所以地球上有些岩石的年龄十分小，只有几亿年的时间。只是在加拿大和南非高原的少数地方，发现了一些最古老的岩石，根据测定，它们的年龄大约在35～36亿年左右。至于地球形成之初的痕迹，由于地壳的变迁，现在已经无从寻找了。上述这些岩石的年龄，只能算是地球年龄的最低限度。地球确切年龄的确定，要由天文学家来解决。

现代天文学已经找到有力的证据，表明太阳系中的行星是从一种具有均匀的元素组成的星际介质中形成的。行星及其卫星，以及彗星、小行星等天体是在差不多相同的时候从星云中凝聚而成的。因此，从其它天体的历史这面镜子中，我们可以指望找到了解地球起源的钥匙。我们能够直接进行分析研究的天体实在是很少的，最主要的当然是天外飞来的陨石。陨石不易收集，尤其大的更为稀少。但是我们对已有的陨石用放射性同位素等方法进行的测定表明，它们的年龄，也就是它们凝固的时间都集中在45～46亿年之前这段时间内。例如1976年3月8日在我国东北吉林地区降落了一次世界罕见的大陨石雨。这些陨石中最重的达1770公斤。通过对这种陨石的测定，发现它的年龄也在45～46亿年之间，这种年龄上的一致性说明陨石差不多是在前后一亿年左右的时间内从原始星云中凝聚出来的。从那以后，它们没有象地球的岩石一样经历过地壳活动的种种沧桑变化，因而保留了当初形成时的信息，成为我们考察太阳系以及地球历史的难得的见证。

除了陨石之外，我们手头能够直接分析研究的天体样品

还有月球上带回的岩石样品。美国阿波罗计划的飞行员在1969年7月首次登上月球。在以后的几年内，他们从各个不同的着陆地点带回了许多岩石标本(见图3.4)。对标本的分析可知这些岩石的年龄分别是37亿年、40亿年、33亿年。然而最重要的结果是发现在各个着陆地点，较小的碎石比大块的石头年龄要大得多。小石头的年龄都集中在46亿年前后。这个数值恰好与陨石的年龄相一致，说明月球上的固态物质也是在那个时期最早出现的，此后没有再熔化过。

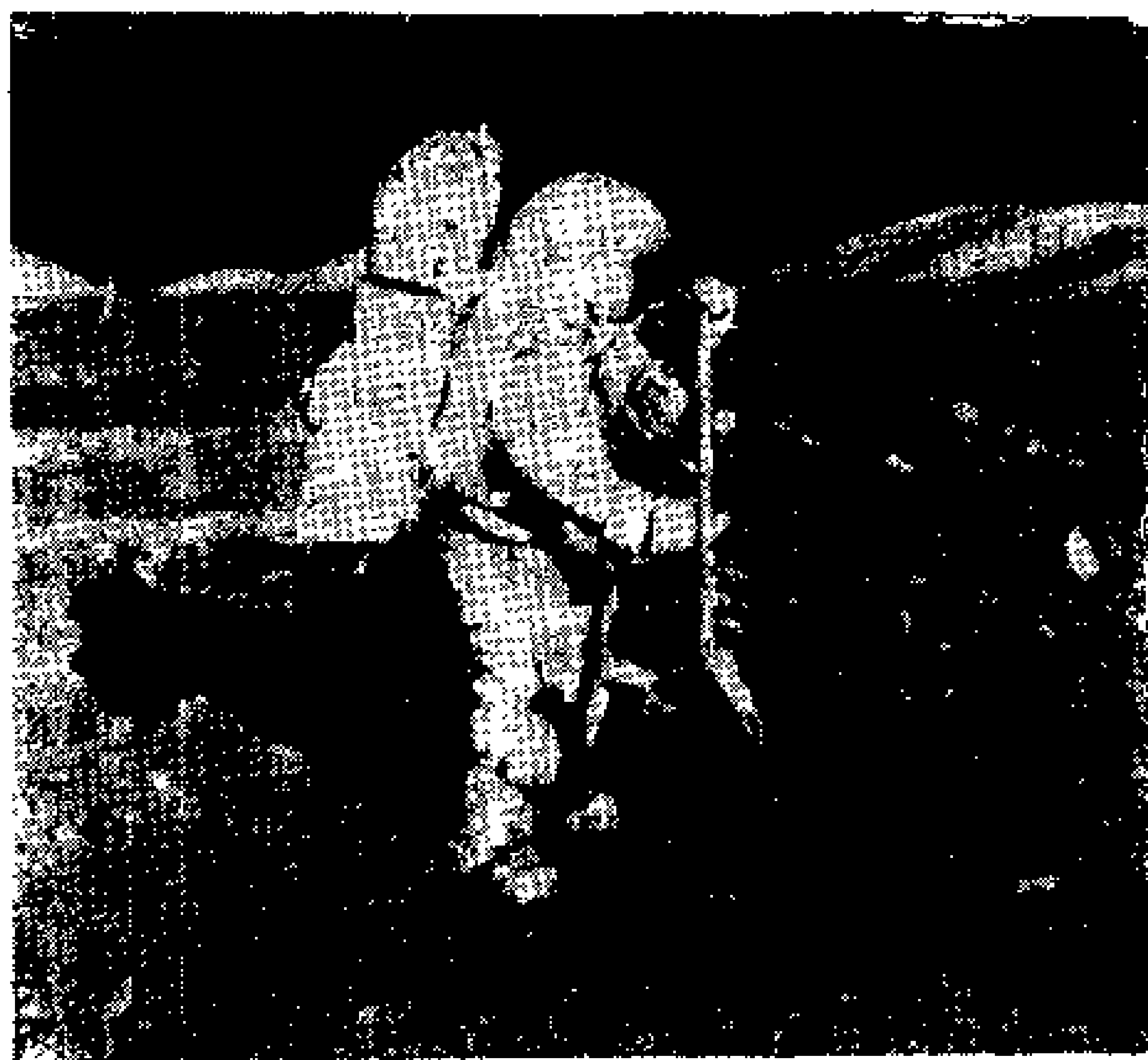


图3.4 阿波罗17号的宇航员在月球上采集标本

来自太阳系空间如此不同地点的标本都有差不多相同的年龄，这一点清楚地说明了：行星、卫星以及其它一些小天体是在太阳形成的某一阶段同时形成的。我们的地球也是在这段不长的时间内形成的，即在46亿年前形成。这样我们不仅

确定了地球的年龄，也确定了整个太阳系从原始的星云中脱胎而出的日期。

关于银河系的年龄，我们就掌握得远不是这样确切了。事实上，关于银河系的起源问题，以及一般的星系的起源问题，是当代天体物理中一个十分困难而尚未解决的问题。不过，在银河系中，我们也能找到一些十分古老的天体，给我们指出星系年龄的大致数值。这种古老的天体就是球状星团。现在的星系演化理论认为，球状星团是在银河系形成的过程中诞生出来的。银河系形成之初是一团气云，还没有今天这样的扁平盘状，气云中比较稠密的区域首先收缩而成为球状星团的前身，这种气团一边在银河系的引力场中运行，一边在自身内部形成恒星，但它在运动过程中会失去所有来不及凝聚成星体的物质，因此球状星团中的恒星差不多是同一时期形成的，此后便没有"原料"了。球状星团中恒星的年龄都是差不多的，这就提供了一个估计它的年龄的办法。我们知道，恒星演化的快慢，也就是它的核燃料反应速度是与质量密切相关的。质量越大，恒星演化得越快。球状星团中的星差不多是同时出生的，它们中的质量较大的恒星演化得也较快，因而较早变成一颗红巨星——恒星演化的晚期阶段之一。这样，如果我们对一个球状星团中的红巨星质量进行统计，就可以知道已经有多大质量的恒星进入了晚期。如果一个球状星团中有的红巨星质量比较小，就说明球状星团诞生得比较早，不仅质量大的恒星早已进入晚期，就连小质量的星也进入晚期了。因此，根据球状星团中红巨星的质量就可以了解这个星团的年龄。例如在一个典型的球状星团中，发现质量大于0.8倍太阳质量的恒星已经变成了红巨星，说明象太阳这么大的恒星早已进入晚期，而我们知道，太阳这样的恒星一般要

经过100亿年左右才会进入晚期，于是可以估计球状星团的年龄在100亿年以上。用上述方法，估计出大多数球状星团的年龄都在100～130亿年上下。因此可以认为星系年龄至少也有100亿年以上。

天文数字一定是巨大的吗？

人们常用“天文数字”来形容那种巨大的数目。这不是没有道理的。我们已经看到，宇宙中的天体，在距离上都十分遥远。最近的恒星离我们也有几十亿公里。这样巨大的数字凭日常的经验很难以想象。天文学家常用另一种尺子来度量大范围的空间，就是光年。一个光年即为光走一年所行进的路程，大约等于九万四千六百亿公里。天文学上还有一个常用的尺度，就是秒差距，等于3.26光年。有时候，连这样的尺度也嫌太小而要用“千秒差距”，“百万秒差距”等一些单位。

时间方面的天文数字同样也是巨大的。天体的变化用地球上人的一生以至于整个人类的历史来衡量都是不够的，缓慢的变化要积累成显著的效应，需要漫长的岁月，所以谈论天体的演化，也都是用几千万年，甚至几十亿年这样的巨大数字。

但是近年的观测却使人感到有向相反方向的另一种趋势，就是在一些新现象中发现有关的时空尺度越来越短。在过去的观察事件中，快速变化的现象是十分罕见的，没有引起多大重视。例如，我国宋代曾记录到一颗奇特的“客星”。在二十三天的时间里，亮得白天都看得见，整个可以看见的时间，也不过二年左右，这种现象同天体的长期不变化的习性相比，简直可以说是一瞬间发生的事。

到了这个世纪六十年代，就在当年这颗“客星”出没的地方，射电天文学家发现了一颗脉冲星。这颗脉冲星的行为显

得和不变的天空更加不协调：它会发出极迅速的无线电脉冲信号，一秒钟内就有30个脉冲。这种脉冲是哪里来的呢？现已证明，它们是一种快速自转着的"中子星"发出的，每转一周便形成一个脉冲。这样迅速的时间变化必定意味着星的空间尺度也是极小的。我们的地球每天自转一周，在赤道上就是每天四万公里的速度。如果让它每秒自转三十周，那么坐在地球赤道上速度就可以达到120万公里/秒，比光速还大四倍！因此，中子星的尺度必定要比地球的尺度小得多，事实上，它只有20公里直径。这样大小的东西在那种其大无比的天体的行列里也能占一席地位么？能！而且我们下面将会看到，中子星还有许多奇特性质，天文学家对它们的兴趣要比其它许多恒星大得多。

象这样发出短促脉冲的星从六十年以来，已发现了许多。它们中间有的不仅发出无线电脉冲信号，而且还发射X射线和γ射线的脉冲信号。例如前面已经讲到，发现了能发出短暂脉冲的X射线星，脉冲持续时间为若干秒，它们实际上是一些爆发。有一颗爆发星还会发生连珠炮似的爆发，这种现象刚发现时，对于习惯认为天体变化十分缓慢的人来说，一定会吃惊得目瞪口呆。γ射线范围内观测到的剧烈变化，最短的只有0.1秒，有的能在1毫秒时间内上升到最大强度。所有这些变化不息的天体，除一部分已确认是中子星以外，其它的都还无法确定它们的本质。但它们表明：自然界既有尺度大、变化慢的天体，也有尺度小、变化快的东西。天文数字不一定总是很大的了。

新尺度带来的新气氛

脉冲星以及后来在X射线、γ射线观测中的新发现，给

天体物理学带来了新的气氛。这一点，如果我们考虑一下这些天体的质量和能量密度就可以看出来了。以中子星为例，它的半径只有十几公里，但质量达到一个太阳的质量，发出的辐射与一颗普通的恒星差不多。这么大的质量和能量紧挤在半径为十公里的一个小球中，将是一种什么样的状态呢？就质量密度来说，它可以达到每立方厘米1千万吨到十亿吨！每立方厘米物质每秒发的光有100亿焦耳。磁场强度可以高达一万亿高斯(地磁场为半个高斯左右)。中子星的密度已经达到和超过了原子核内部物质的密度，只有在高能加速器中猛烈的碰撞瞬间，才会产生如此高的密度。中子星物质的状态，是地球上研究高压下物质性质的物理学家所不敢梦想的。这种状态下的物质，不能用我们日常的固态、液态和气态来理解，甚至同普通恒星中的等离子态也完全不同。至于其它一些本质不明的天体，可能具有更加极端的条件。总之，高能、快速、致密、强场、爆发等等，就是六十年代以来天文学新发现的共同特征，它使人们对天体及其演化的传统看法为之一新。

天体物理学，本来就是天文现象和物理规律二者的结合，在新的天文现象面前，这种关系更加密切了。物理学的各个方面，都渗进了天体领域，来帮助认识这些新的现象。从而产生了高能天体物理，相对论天体物理等等新分支。例如，超新星爆发现象在中子星发现之后受到很详细的研究，人们认识到中微子在超新星爆发中起着关键作用，大体的图象是：恒星演化到晚期后，由于中微子发射引起的能量流失造成核心部分坍缩而形成中子星或其它致密天体，同时，外围在中微子风的压力下爆发，形成扩张的气壳。然而定量计算却表明，中微子与物质的作用太弱，并不能形成足够的压力造成猛烈的爆发现象。因此，关于超新星爆发的认识总有着不圆满的地方。

1973年，提出了弱相互作用同电磁相互作用统一的理论，不久得到了基本粒子实验的证实。根据这个理论的计算表明，中微子同星壳物质的相互作用比旧的理论要大二百倍。于是就完满地解释了超新星的爆发现象。

天体物理学同物理学其它领域的密切结合也反映在天体物理学家的“成分”上。在宇宙学中作过重要贡献的伽莫夫(G. Gamow)，曾在玻尔、卢瑟福手下学原子核物理。量子力学的开创人之一的狄拉克(P. A. M. Dirac)，有很大一部分工作是属于宇宙学的。因为提出激光原理而获得诺贝尔奖金的汤斯(C. Townes)，同时也是一位研究星际分子微波波谱的天体物理学家。因为提出了弱相互作用与电磁相互作用的统一理论而获得很高声誉的美国物理学家温伯格(S. Weinberg)，近年写了一本书：《最初的三分钟——关于宇宙起源的现代观点》。原来，他同时也是一位天体物理学家。

历史上看，牛顿把人们生产活动中的力学规律同精密的天文观测相结合，总结出了牛顿的运动定律和万有引力定律。今天，天文学和物理学再次相互紧密合作是否也会出现人类认识的新的突破呢？似乎是很难予以否定的。

第四章　太阳依旧不寻常

太阳——一颗寻常的恒星

太阳是我们最熟悉的天体。它的光和热哺育着地球上的生命。没有太阳，就不会有我们今天这样繁花似锦、欣欣向荣的世界。所以在古代，以至于在今天的许多人的心目中，太阳在天体中的地位是独特的。但是如果把我们的眼界扩大一点，就会发现太阳这样的天体实在是宇宙中最常见的“居民”。夜空中的每一颗星，几乎全都是一个个的太阳。我们的银河系，就是一千多亿颗与太阳同类的恒星组成的系统。太阳之所以与众不同，只是它比其它所有恒星近得多而已。

太阳这样一种寻常的地位，在恒星的赫罗图（图4.1）上看得最清楚了。赫罗图的纵坐标是恒星的光度（也就是总的能量输出），横坐标是表面温度。每一个恒星有一定的光度和表面温度，它在赫罗图上对应于一个点。如果将一群恒星表示在赫罗图上，就会发现它们的点并不是随意分布在图中的，而是多数集中在从左上到右下的对角线上。这对角线称为主星序。在主星序的右上方，有表面温度低但光度大的红巨星。在左下方，是所谓的白矮星、它们在恒星的总数中只占百分之十。太阳既不是红巨星。也不是白矮星，而是属于数目最多的主序星之列。而且位于主星序的中段，它的表面温度是6000度左右，而有些蓝星的表面温度可高达4～5万度。恒星在赫罗图上的位置还决定了它的半径和稳定发光的寿命，在这两个方面，太阳也是十分平常。那种质量大、光度大的恒

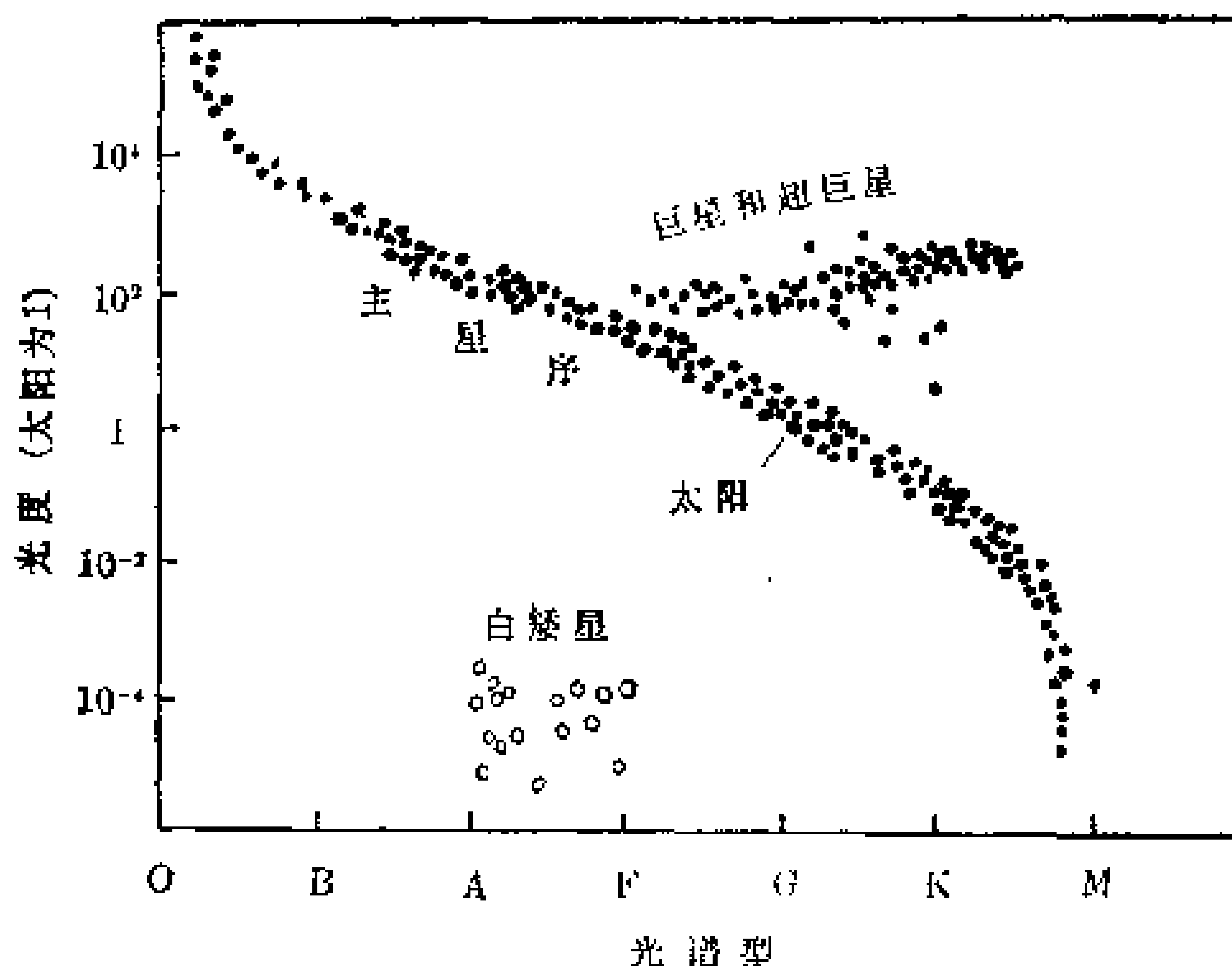


图 4.1　赫罗图纵坐标为光度(或总能量输出)，以太阳光度为单位。横坐标是光谱类型，它同恒星表面温度是密切对应的

星消耗能量很快，有的在一千万年时间内就结束稳定发光的生命了。而质量小的却可以慢慢地发光达一万亿年之久。太阳稳定发光的寿命中等，约一百亿年。我们已经知道太阳形成以来约有 46 亿年，因此还要过五十多亿年，太阳才会消耗完它的能量。目前它正是"身强力壮"的时候。

总之，地球上的生命，人类赖以生存和发展的太阳，在恒星世界里，是一个一点也不值得骄傲的寻常的成员。

太阳的能源

太阳所以成为万物生长的源泉，就是因为它给我们地球提供了源源不断的能量。在原子能开发之前，地球上各种形式的能源归根到底都是来自太阳。太阳给地球提供的能量是极为巨大的，即使所有发电厂的功率加起来，也只有太阳能量

的十万分之一。但这个巨大的能量在太阳辐射的总功率中却只占二十亿分之一。绝大多数的太阳能都散失到太空中去了。

太阳的能量究竟是怎么产生的呢？只要不受亚里士多德那种天界不可认识的思想束缚，自然会提出这样的问题。对于太阳能源的第一个科学假说，是大约一百年前由德国物理学家亥姆霍茨(H. L. F. Helmholtz)提出的。当时，他认识到太阳的巨大能量显然不能用一般的化学燃烧来解释，因此提出了太阳能量来自引力收缩的假说。太阳物质因为收缩，引力势能转变为光和热。据他计算，这样的能源够维持三千万年之用。这个时间比人类有记载的历史要长多了。但当时达尔文的生物进化学说已经被许多人接受，从生物进化的要求来看，这个时间还是太短了，于是生物学家提出了反对意见。

十九世纪末和二十世纪初，人类对自然界的认识发生了巨大的革命。放射性和原子内部结构的发现，以及爱因斯坦提出的著名的质量-能量转化公式 $E=mc^2$，提示人们去寻求新的太阳能量来源。英国天文学家爱丁顿(A. Eddington)猜测，可能是电子和质子相互湮没，它们的质量全部转化为辐射能量。这样的能源确实是巨大的，够太阳消耗15000亿年。可是实际上电子同质子湮没的现象并没有见到过，太阳上是否会发生这类过程很难断言。

1932年，发现了中子，原来电子和质子挤在一起并不湮没，而是成为中子。在此同时，原子核以及核反应的研究取得了巨大进展。天文学家对于太阳的研究也获得了许多新的知识。1938年，伽莫夫在华盛顿召集了一个物理学家和天体物理学家的会议，双方交流了各自领域中的新情况。在此基础上，物理学家贝蒂(H. Bethe)提出了太阳以及一般恒星能量

生成的现代理论。

这个理论认为，太阳的真正能源在它的核心部分，太阳中心温度很高，物质的原子结构遭到破坏，电子被剥离了原子核。这种物质状态称为等离子体状态。一部分原子核可能获得极高的速度，能克服原子核之间的电斥力而发生碰撞。碰撞的结果会使较轻的原子核合成较重的原子核，这就是热核聚变反应。氢弹释放能量的过程就是这样一种聚变反应。太阳中辐射出来的能量，正是聚变反应中释放的。它是四个氢原子核即质子合成一个氦核的过程，每个氢核在反应中有0.7% 的质量转化为能量，这样的过程比化学过程释放的能量要大一百万倍。这就说明了太阳及其它恒星看起来是取之不尽的能源。

实际上在太阳中进行的热核反应有两种不同的过程。一种叫质子-质子反应，它是先由两个氢核合并为一个氘核，同时放出一个正电子和一个中微子。氘是氢的同位素，由一个质子和一个中子构成其原子核。氘核又和一个氢核聚合而形成一个氦 3 的核，氦 3 是氦的一种同位素，由两个质子和一个中子构成，两个氦 3 核再反应而变为一个氦核，同时还产生两个质子，这两个质子又投入新的反应中。上述一系列反应的总效果便是四个质子合成一个氦核，并放出正电子、中微子以及大量辐射。热核反应的另一个过程称为碳氮循环反应，在该反应中碳和氮起着类似催化剂的作用，使四个质子聚变而成为一个氦核，而碳氮在反应前后数量不变。质子-质子反应在几百万度就可以进行。伴随这种反应，还会有另一种过程发生：氦 3 核有时同氦核反应而合成为铍 7 的核，铍 7 核俘获一个质子便产生硼 8 的核，硼 8 很容易衰变成铍 8，放出一个正电子和高能中微子，铍 8 最后又分裂为两个氦核。这个

反应的总效果仍然是从氢核变为氦核，对太阳能量产生影响不大，可是它有高能中微子产生。目前的理论认为太阳中主要产生能量的过程是质子-质子反应，比太阳重和热的恒星可能会以碳氮循环为主。这些反应释放的能量最初是以X射线和γ射线的形式出现的，经过无数次的吸收和散射，它们才到达太阳表面，以光和热的形式发射出来。

太阳的质量是十分巨大的，氢又是它的最丰富的元素，用氢作"燃料"的热核反应预计可以使太阳在一百亿年时间里稳定地发光。整个宇宙的其它恒星，大多数也是象太阳一样，靠着氢这种热核燃料在维持它们的能量支出。这是恒星一生中最漫长的稳定时期，对应于赫罗图上的主序星阶段。处在该阶段的恒星，本质上就是一个热核反应炉。这个"炉子"没有外壁，靠着自身的引力，把炽热的等离子体约束在一个球形区域内。太阳能以光和热的形式辐射到地球上，若被贮存在植物体内，就成为烧柴或烧煤时释放的化学能；若被贮存在高山流水内，就成为可用来发电的水力资源。所以说，太阳能本质上也是原子核能。人类依赖着这种能量生活，到了二十世纪才弄清了它的本质。一旦认识了以后，人们就想在地球上实现这样的反应。现在确实已经实现了，这就是氢弹的爆炸。但氢弹爆炸时能量是一下子放出来的，只能起破坏作用。要使热核反应成为可控制的过程，将能量按需要释放出来，这便是国内外近年来都在探索的受控热核聚变反应；当此项研究得以成功，将使人类又一次取得巧夺天工的伟大成就。

观察恒星内部——太阳中微子实验

虽然热核反应作为太阳或恒星能源的理论已获得了科学界的公认，提出这一理论的科学家贝蒂因此获得了诺贝尔物

理学奖。然而理论还要靠实践来检验。这个理论在大的方面虽然已被证明是十分成功的，但在一些定量的细节上却很难加以验证。因为太阳的核反应炉是深深地埋藏在中心部分的，它周围有大量不透明的物质包围着，在地球上无法直接看到其中的实际反应过程。通常的天文仪器，只能探测太阳最外层来的光和其它粒子。中心部分的反应能量要经过三千多万年的无规则散射过程才转移到表面。我们所测量到的，已不是最原始的信息，今天射到地球的能量，还是人类没有出现时候太阳内部反应所产生的哩！

不过，对理论进行直接的定量验证有一个办法。在理论所预言的热核反应中，会产生一种粒子，它能够穿过太阳物质的重重阻挡，顺利地从中心来到表面，这就是中微子。前面介绍过，它与其它粒子的相互作用十分微弱，因而从太阳核心的反应炉里产生的中微子几乎可以不受阻挡地飞向地球，几分钟内就把太阳内部的反应情况传到地球上。我们要透过太阳外层的重重障碍，"看到"它内部的情况，看来只有利用中微子了。中微子是给我们带来太阳核区能量生成过程的情报的唯一信使。

太阳中产生中微子的反应有好几种。它的总能量辐射中，有百分之三十就是以中微子形式发射的。这些众多的中微子穿过太阳外层时简直象在真空中行进，每一千亿个中微子只有一个会被太阳物质吸收或散射，其余全部跑到外面来了。我们地球对于这些中微子更是"透明"的了，即使一千个地球排成行也挡不住它的去路。我们通常用铅屏蔽来阻挡X射线等穿透力强的辐射，可是用铅来阻挡中微子的话，铅壁要做得1000光年那么厚！所以说，太阳中微子的照射对地球无日夜之分，白天中微子从头上照向我们，晚上它透过地球从脚

下照射我们，强度几乎没有什么两样。如此看来，中微子这个信使固然能穿墙透壁，传递信息又快；但同时给我们的探测也带来巨大的困难。因为所有物质对它几乎都是透明的，这就很难找到合适的材料来制作其探测仪器。捕获中微子确实需要高超的技巧。

早在四十年代，就有人提出一种探测中微子的方法。那是利用氯的一种稳定同位素氯37的性质。该同位素在吸收一个高能中微子之后，会发射出一个电子而变成氩的同位素氩37。这是一种放射性同位素，通过对它的测定，就可以计算出中微子的数量。要进行此项工作当然是非常艰难的。因为氯37吸收中微子的机会也是极其微小的。一个氯原子要吸收一个中微子，必须等上10^{30}年以上的时间。不过我们可以用大量的氯原子来吸收中微子，这样的"氯海战术"就可能大大增加吸收中微子的机会。1970年以来，国外的一些科学家就是用该方法来测定中微子的。

这方面时间最长、最系统的工作是美国布鲁克海文实验室的中微子探测实验。为了避免宇宙射线及其它干扰因素的影响，他们在南达科他州一个叫做霍姆斯代克金矿的矿井深处安放它们的探测器。矿井深1500米，如此深度对干扰因素有很好的屏蔽作用，对中微子却等于零。事实上探测器在夜晚还完全一样地受到太阳中微子穿过整个地球而来的照射。探测中微子的物质是四氯化碳(CCl_4)液体，净化后的这种液体共610吨装在几层楼高的钢箱中，合40万升左右。这么巨大数量的物质中含氯原子达10^{30}个以上。真可以算是一片氯原子的海洋了，可是它捕获的中微子数目仍然是很可怜的。如果真象理论所预言的那样，每秒钟每平方厘米有1000亿个中微子到达地面，那么这么多氯原子吸收的中微子一天也不

到一个。也就是说，钢箱中的四氯化碳液体被中微子照射一天，也产生不了一个氩37的原子。幸运的是，氩37是惰性元素，它只可能衰变为氩的其它稳定同位素，而不会发生化学反应，所以经过长期的耐心积累，用沸腾的氦将氩冲洗出来，测定其中氩的同位素量，便可以计算中微子的数量了。

这样测得的中微子只是太阳中微子中的高能部分，因为氯37是不能吸收比0.814兆电子伏能量更低的中微子的。前面提到过的太阳核区反应中，有一种反应是硼8放出一个正电子和中微子衰变为铍8。该反应中放出的中微子属于氯37可以吸收的能量范围，而质子-质子反应中产生的中微子则低于这个能量范围，所以用氯37探测的中微子将只是对太阳核反应中的一种反应进行的检验。但是太阳中各个反应是相互制约和影响的，而且都受到太阳核区的温度等因素的影响，所以中微子实验也是对整个太阳能源理论的检验。

中微子实验的结果是出乎人们意外的。实际测得的中微子数量与标准的理论模型计算得到的值有很大的出入。例如在一次历时数月的实验中，根据理论估计应吸收到90个中微子，但实际上却只测定到10个。1978年，他们总结八年的测量，得到一个统计平均值，以每个氯原子每秒捕获10^{-36}次称为1个太阳中微子单位，那么这个值是1.7 ± 0.4，而标准的理论值为4.7个太阳中微子单位，差不多等于实测值的三倍。这就是所谓"中微子失踪案"的由来。上述理论与实验之间的矛盾，是反映了我们对太阳核心区的能量产生过程没有认识清楚，还是反映了我们关于原子核或中微子物理过程认识不正确呢？或者，是因为我们的测量方法、技术不完善吗？"中微子失踪案"提出了尖锐的问题。

可见太阳这颗寻常的恒星还有不寻常的谜需要去解开。

而且关于这个高悬在我们头上的太阳，它的奥秘却要从最深的地底下去揭示。

几种可能的出路

太阳中微子既然关系到我们对于太阳及恒星的能源和演化的认识，甚至涉及到我们对于中微子等基本粒子的基本看法，因此，它确是一个重大的课题。近年来，各个不同领域的科学家都从各自的角度出发，参加到寻求其解答的工作中来。

对于中微子失踪的解释，大致上可以分为两派主张。一派主张认为，太阳内部确实产生了理论预言那么多的高能中微子，只是在它飞向地球而被探测出来的过程中，以某种方式损失了一部分。另一派主张，太阳内部根本没有产生过理论预言那么多的中微子。所谓失踪，是我们关于太阳中核反应过程的理论有问题。

如果中微子失踪真是前一派主张所认为的那样，那么说明我们对基本粒子的知识还存在着错误。这一派中有的人主张，中微子并不是没有静质量的粒子，它在从太阳到地球的旅途中变成了另一种更轻的中微子。而更轻的中微子是完全惰性的粒子，不能被氯37原子吸收。不过，初步估计说明这种推测根据并不充分，因为如果这种转变过程存在的话，它的衰变寿命要比太阳中微子从太阳到地球飞行时间长十万倍以上，因此只可能有极少数中微子转变掉了，大多数仍然会被氯37吸收。还有一些猜测，中微子并非没有磁矩，而是有极小的磁矩的，那就使它在穿过太阳时，会与电子发生电磁相互作用，从而损失掉一部分能量，低能的中微子无法为氯37吸收，于是就解释了观测值的不足。不过中微子磁矩是否存在，目前没有任何直接的证据。

有人还怀疑，在检测过程中，氯37吸收中微子之后变成的氩37是否全都被液态氦冲洗出来了。或者怀疑氩37是否完全惰性，会不会与其它原子相结合而成为分子。为此实验工作者设计了一系列的试验来检查其可能性。结果证明了这些怀疑是不能成立的。这样看来，中微子产生之后又在路上或探测过程中失踪的可能性似乎不大。

那么另一派主张又怎样呢？前面指出，氯37所吸收的是高能中微子，是硼8衰变时所释放的。而硼8是由铍7俘获质子而形成的，而铍7的多少又取决于氦3核和氦核相聚合的频繁程度。我们知道，在质子-质子反应中，有一个环节是两个氦3核形成一个氦核和两个质子，如果这种反应的可能性增大，则参与聚变成铍7的反应的氦3就会大大减少，使该反应较少发生，从而高能中微子数目也会减少。因此有人设想可能存在某种粒子，它对于质子-质子反应犹如催化剂一样，能使反应比现有理论预言的更为频繁，于是便可以解释中微子产量的减少了。不过，这样的过程没有其它的实验或理论证据。

另一方面，铍7以及硼8的产量对于太阳核心温度是很敏感的。只要这个温度比理论预计的值低百分之十，中微子的产量就会降低到与实际值相等的水平。太阳核心温度是与太阳物质的传热性质直接相关的。如果太阳物质对于中心辐射是不透明的，传热能力很差，大量能量就会贮存在中心而不能发散出去，中心温度便会升高。可是，太阳物质的透明程度主要取决于其中重元素碳、氧、镁、硅、铁等的含量。如果这些元素数量较少，太阳物质的传热性质就较好，中心温度便不会很高。如此环境之下，中微子的产量也会降低。

还有一种意见认为，太阳内部有很强的磁场。我们知道

太阳表面的磁场仅几个高斯，但中心如果有近十亿高斯的磁场的话，中心温度也会降低。因为磁场会产生一个附加的磁压力，它可以代替一部分等离子气体的压力来抗衡中心区的太阳引力，因此气体压力可以比没有磁场时小一些，从而温度也可以低一点。这样的解释有一个漏洞，就是强磁场很可能扩散到太阳表面而散失掉，于是中心温度又得上升才能维持平衡，中微子又会增加。再有一种意见认为太阳内部有快速的转动，转动产生的离心力也可代替一部分气体压力，使温度不必要求很高。但快速的转动会使太阳变成扁状，而目前的精确测量表明，太阳的扁平程度是极小的。总之，说明太阳中心温度降低的解释有好几种，每一种都不能令人完全满意。

最后，还有一种主张，既能说明中微子失踪的问题，又能维护原来的太阳核反应理论。该主张认为太阳的能量生成过程有一种长时期的时而剧烈、时而平静的变化。近代科学的记载证明，太阳的黑子有时多时少的周期性变化。例如在1645年到1715年间，太阳黑子的记录十分稀少，而我国古代则记录过大量太阳黑子的现象。那么太阳还有没有周期更长的变化呢？这样的猜测不是毫无根据的，一般认为我们地球历史上的冰河时期，就是因为太阳辐射的强度变化造成的。假如果真如此，则说明太阳的长达千、万年计的变化确是存在的。因而有人设想，中微子给我们带来的是八、九分钟以前太阳内部的情况，而今天太阳的辐射能量是经过上千万年的时间才从太阳内部传到表面的。所以这两者反映的是不同时期的太阳状态。或者说，中微子的多少基本上反映了太阳当前的核反应情况，而太阳的辐射则反应了上千万年以前的情况。如果由于某种原因，太阳中心温度在目前已有所降低，它产生的中微子当然会减少。而我们关于中微子数量的理论计算，则

是根据太阳辐射的现在水平来进行的，这两者出现差距也就不足为奇了。

总之，目前，中微子失踪案还没有了结。有人甚至提出了更为离奇的主张。认为太阳中心根本不是普通的氢和氦构成的，而有一个小黑洞藏在其中。我们在第六章里将系统介绍黑洞的理论和观测情况，这里只是稍稍提一下：黑洞能不断地“吞食”周围物质，在此过程中，有能量释放出来。这样产生的能量至少占太阳总能的一半，而且无中微子产生，于是也就解释了中微子数目减少的原因了。当然，这种解释中，猜测的成分更多一些。

为了最后将失踪的中微子捉拿归案，实验工作者们正在设计新的实验。新实验的目的之一是探测那些从质子-质子反应中产生的能量较低的中微子。质子-质子反应是太阳能量过程中最主要的反应，太阳的光度很大程度上是由它决定的。但探测此类反应中的中微子比原来实验更为困难，要求更大规模、更长时间的测量。例如，现在已经在考虑用镓71来俘获中微子产生锗71，这个反应可以探测到能量在0.233兆电子伏以上的中微子，而质子-质子反应产生的中微子能量是0.42兆电子伏，刚好在它的探测范围之内。据估计，要产生每天一次俘获事件，大约要50吨镓，价钱是极为昂贵的。科学家们只能设法用租借的办法来解决材料来源。也有人提出了一些其它材料探测的方法，困难也是不小的。当然，对于出现在自己家园门口的这场挑战，科学工作者是责无旁贷的。我们相信，通过艰巨而耐心的实验研究，中微子失踪案一定会真相大白的。

第五章　脉冲星与中子星

关于恒星晚期演化的预言

四十年代和五十年代，恒星能量生成的理论取得了巨大的成功，同时也成了研究恒星演化的理论基础。不过在那个时候，恒星的演化即使在天文学家的心目中，也只是指主序星阶段的演化。这个时期的恒星，能量的"收支"基本上是处于平衡的。至于核燃料消耗完以后的恒星晚期将如何演化，这个问题的重要性是很少有人认识到的。

当时关于恒星演化到晚期以后的情况，人们所知的主要是关于白矮星的知识。在赫罗图上，白矮星位于主星序的左下方，它们的主要代表，也是最初确定的一颗是天狼星的伴星，早在一百年前就发现了。根据它同天狼星相互绕转的轨道运动的分析，知道这颗星质量同太阳差不多，但光度却只有太阳的百分之二，说明它的体积只有地球那么大，因此，它的密度达每立方厘米 100 公斤以上。

这么高的密度在地球上是难以想象的，一时成了人们经常谈论的奇闻。到了二十年代，提出量子力学，人们才认识到这种高密度物质状态的本质。原来，在恒星稳定地燃烧核燃料时，是靠着核反应产生的辐射和热压力同它自身的引力相抗衡来维持平衡的。核燃料烧完之后，恒星是不是会在自引力作用下无限制地收缩下去呢？不会的，当星体收缩到一定程度，在那样的高密度下，会出现一种叫做电子简并压的压力，只要恒星的质量在大约 1.3 倍太阳质量以下，这种压力就

能成功地抵抗住恒星的自引力。为了说明这种压强的来源，我们还得首先介绍两条量子力学原理。一条是泡利不相容原理，它说在一个系统中不可能有两个电子处于完全相同的状态。这个原理的应用的一个熟知的例子是，用原子结构说明元素周期表的性质时，总是把电子从内到外填充到一层层轨道上去，不允许在同一状态上填两个电子。另一条原理是测不准原理，这条原理说，当电子处于某个状态时，它的位置确定得越准确，则其动量值变化的范围就越大。在恒星晚期达到的高密度下，由泡利不相容原理，电子不可能被压挤在相同的状态中，但由于体积很小，因而每个电子分配到的空间就很小，也就是位置定得较准确，于是根据测不准原理，它们的平均动量值就变得很大，因而动能也就很大。正如气体中分子动能越大，则其压力越高一样，这种状态下电子"气"的压强也很大。这就是电子简并压的来历。电子简并压与恒星的自引力相抗衡，使星体处于一种新的平衡状态。如此形成的天体就是白矮星。

白矮星虽然得到了理论上的认识，但它在多数人看来，好象是博物馆里的展品一样，作为恒星的最后坟墓，有着罕见的超高密度，可以供猎奇者惊叹，却并没有什么启发人的实际意义。



图5.1 美国著名天文学家茨维基（Fritz Zwicky，1898～1974）

但是有少数物理学家却不是这样想。1932年发现中子以后不久，苏联物理学家朗道（L. D. Landau）就猜测，既然中子和电子一样服从泡利不相容原理，那么由中子气的简并压同引力相平衡也将形成一种稳

定的状态。这是关于中子星的最初预言。1934年，美国的巴德(W. Baado)和茨维基(图5.1)根据天文观测指出，宇宙中有时会发生一种“超新星”的现象。他们在一篇简短的文章中指出，“超新星代表了普通恒星向中子星的过渡阶段，中子星在其最后阶段是由紧挤在一起的中子组成的。”这样，他们把中子星同超新星相联系起来，正式提出了中子星的假设。1939年，奥本海默(J. R. Oppenheimer)等人对中子星的结构作了详细的计算。根据这些预言，中子星的直径只有几十公里，质量却比太阳还要大一些。这样的天体密度比白矮星又高一亿倍以上。对于许多人来说，白矮星的密度已经使他们惊叹不已了。中子星这样高密度的天体更加是想都不敢想的了。所以在那些预言发表以后的几十年间，很少有人认真对待它们。正如第一章中所说的，它们被当作异想天开的物理游戏而受到人们的讥讽，渐渐地被科学界所遗忘了。

但是事隔三十年之后，原来受到讥讽的预言却得到了证实。中子星真的被找到了！这在天文学史上是值得大书特书的一件事情。

“小绿人”的故事

1967年，英国剑桥大学天文学家建造了一架射电望远镜。这架新望远镜是为了利用行星际闪烁现象来研究射电源而设计制造的。行星际闪烁同我们常说的星星“眨眼”现象有点类似。当星光通过地球的大气时，由于大气中的不均匀起伏现象，使我们看起来星星发出的光一闪一闪的，似乎在眨眼睛。这种闪烁现象同发光体相对于我们的角尺寸(我们观察发光体时视线所张开的角度)有关。恒星离我们很远，基本上是一个点，因而易发生闪烁；而行星较近，望远镜中看起来是

一个圆面，因而不易看到闪烁。在射电波段也有类似的现象，不过这种闪烁不是大气造成的，而是由充满行星际空间的太阳风引起的。行星际闪烁也同射电源的角尺寸有关，甚至可以提供计算射电源角直径的方法。剑桥新建的望远镜就是为此目的而建造的。因为行星际闪烁在低频段较显著，所以望远镜的工作波段为 81.5 兆赫。又因为闪烁是很快的，所以望远镜应有很高的时间分辨率。但这样一来，信号-噪声比就较小了，于是只能增大望远镜的接收面积。落成后的望远镜占地将近三十亩，是一个 16×128 个偶极天线组成的天线阵(见图 5.2)。

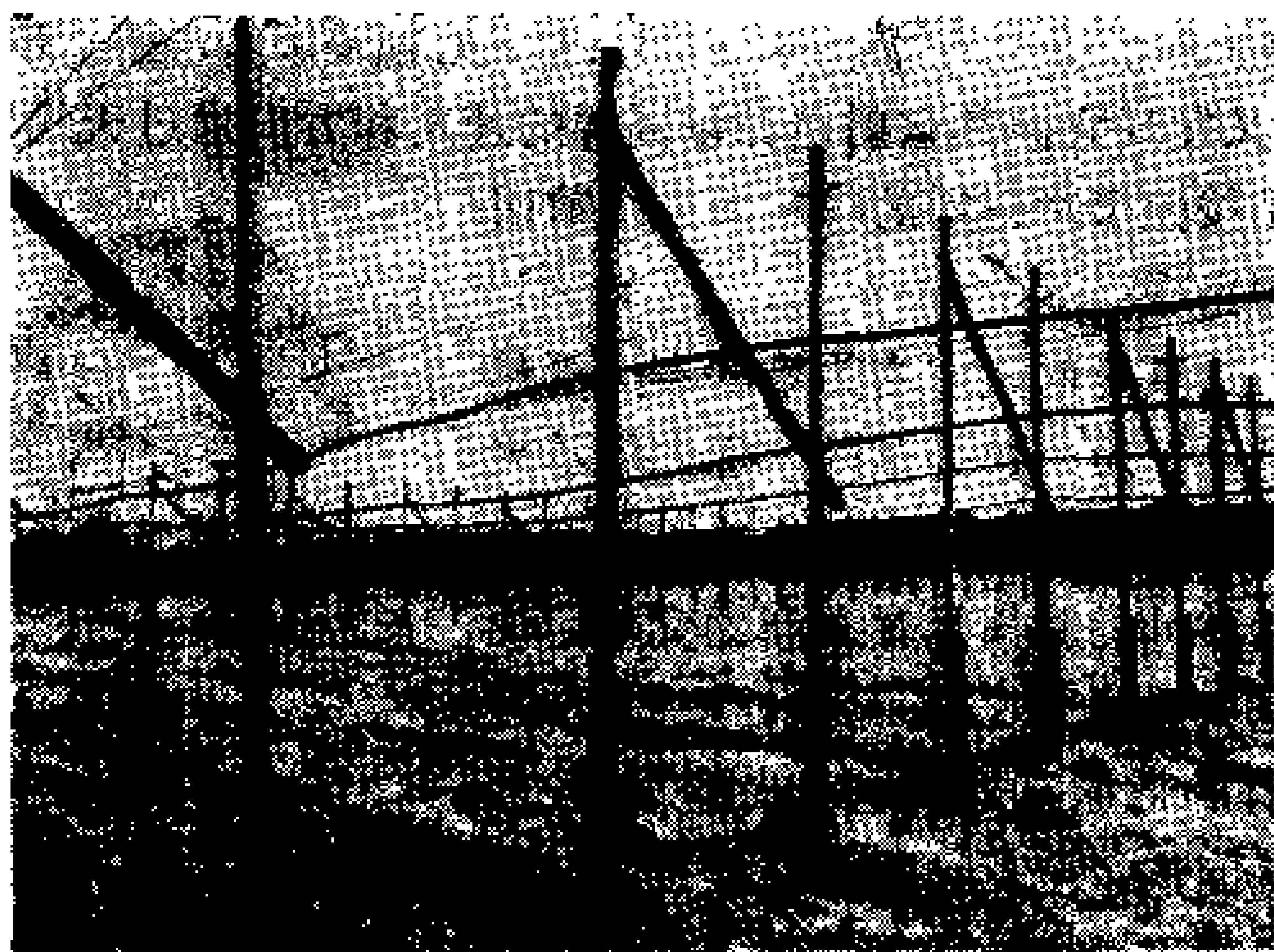


图 5.2 发现脉冲星的偶极天线阵

望远镜从 1967 年 7 月开始观测，每天给出七、八米长的记录纸。记录纸本来可交计算机分析，但因为仪器刚投入运转，为了检查它们是否正常，所以决定由一位叫做乔斯琳·贝尔的研究生(图 5.3)进行人工分析。几星期之后，她从记录

上看出有一段不易辨认的记录，不象是闪烁，也不是其它干扰，而它出现的赤纬都是 +23°，赤经也大致相同，约为 19 时 20 分。这段记录虽然只在一百多米的记录纸上占一、二厘米，却引起了贝尔的注意。她把这事告诉了指导老师休伊什（图 5.4），他们便决定对这一现象作快速记录。经过一番周折，终于在 11 月末获得了第一个快速记录。记录笔描下了一连串脉冲，每两个脉冲的间隔都等于 $1^1/_3$ 秒（见图 5.5）。进一步分析，又发现它同其它射电源以同样的速度和方向通过天线束。它是按恒星时运动的——每天提前四分钟出现。



图 5.3　脉冲星的发现者贝尔(S. Jocelyn Bell)

这真是叫人左右为难的事！既然它是跟恒星一起升落的，那大概是来自恒星的电波吧。但是恒星不可能在数以秒计的时间尺度上产生变化。说它是人为的干扰吧，又是谁按 23 小时 56 分的周期有规律地发出这种信号呢？问遍了全英国的天文学研究组，都得到了否定的回答。进一步的记录证明信号的脉冲周期保持得非常准确稳定。同时发现在其它频率处也有类似的脉冲。低频处的信号比高频处的要晚到一些时间。这是天文学家熟知的星际介质的弥散作用所造成的。从弥散的量，他们算出了脉冲信号源离地球的距离是 212 光年，远在太阳系之外，但在银河系之



图 5.4　英国射电天文学家休伊什(Anthony Hewish)

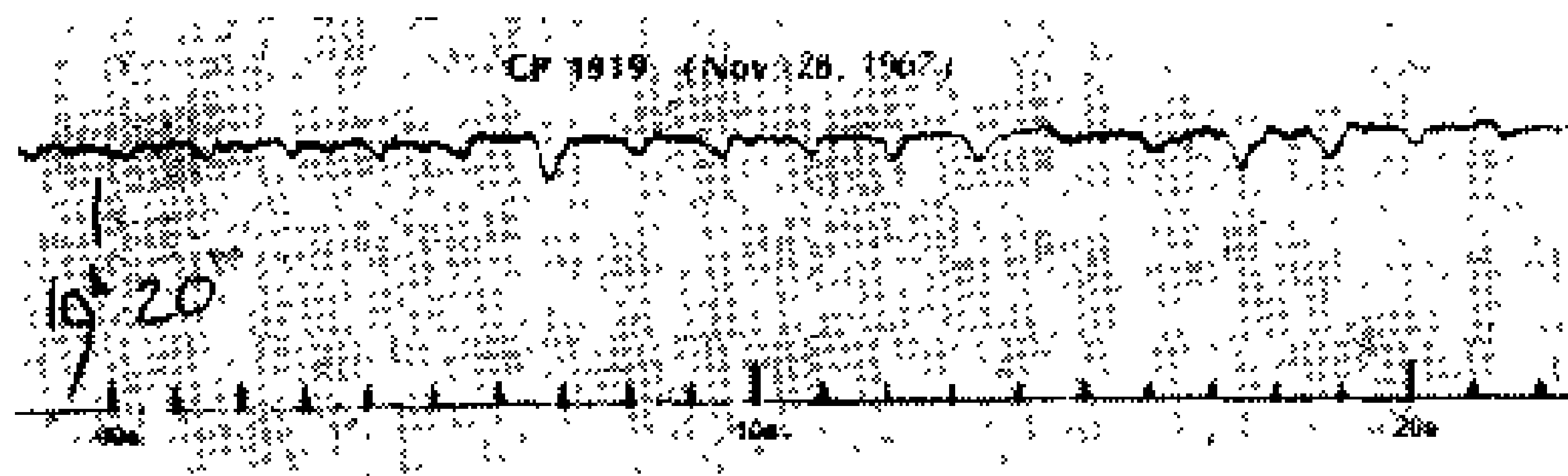


图 5.5　第一颗脉冲星的高速记录，下面是时间信号，间隔为一秒，这是 1967 年 11 月 28 日 19 时 20 分的记录

内。看来，这象天外的"人"发来的信号。

地球外的有理智的"人"早就是幻想小说的常用主题。有的科学家设想，由于其它行星上的引力也许很大，或者因为文明的高度发展而使体格退化，这种别的世界里的高等动物也许体形很小。而且他们也许能不通过植物而直接利用恒星的光能，因而他们的肤色是绿的。……于是，"小绿人"成了人们常谈论的对象。可是，说实在，很少有人当真对待这种幻想。然而，剑桥的望远镜却收到了这种难以解释的信号。也许，"小绿人"正在敲我们的门啦！多么令人兴奋的发现呀！

但科学家是无哗众取宠之心的人。休伊什和他的学生继续仔细观察。他们想，如果信号果真是"小绿人"发出的，他们应当居住在某个行星上，行星绕它的"太阳"转动，应该引起脉冲间隔时间的变化。然而实际上没有这样的变化。到 1968 年 1 月底，进一步的记录和对以往记录的详细检查使他们确信，另外有三个源也会发出类似的脉冲信号。于是"小绿人"的假说只得靠边了，因为不能设想，天上相距如此遥远的四个地方的"小绿人"会约好了在同样的频段上，在同样一段时间里给我们地球打信号。

于是，寻求答案的努力方向又从理智的生命转回到自然

界。什么样的天体才能发出如此快速而又稳定的脉冲信号呢？第一，天体的尺度应当很小，因为否则的话，天体上距我们不等的各个点发出的脉冲会相互重迭而使我们无法分辨出一个个的脉冲。根据观测到的脉冲宽度是16毫秒，可以定出天体的发射区尺度应小于3000公里。这样小的尺度看来只能是白矮星或中子星。第二，脉冲周期为1.3372275秒，而且具有高度的稳定性，准确程度达到10^{-8}秒。天体上的周期性过程无非是三种：轨道运动，脉动和自转。轨道运动在考虑"小绿人"这种可能性时已被排除。后来的精密测量又排除了脉动的可能性。因而观察到的周期脉冲只可能是自转造成的。最后，所发现的脉冲周期是一秒的数量级，而既然这是自转造成的，说明星体要在一秒多一点的时间内自转一周。计算表明，白矮星在这样疯狂的转速下早就被扯得粉碎了。于是结论只有一个——这种被人们称为"脉冲星"的天体就是快速自转着的中子星！

到1978年，人们已经找到了300多个脉冲星。它们的周期短到0.033秒，长到3.7秒。新的观测事实进一步证明了它们都是自转着的中子星。由于这一重大发现，休伊什获得了1974年诺贝尔物理学奖金。三十年代一项不引人注意的、甚至受到嘲笑的纯理论预言，到六十年代终于得到了光辉的证实。看来，对现有的理论追究到底，尽管会得到一些难以为世人接受的"奇谈怪论"，但其中也许包含着真理，会为日后的科学发展揭示出来。中子星预言的遭遇，就说明了这一点。

蟹状星云脉冲星

既然中子星是自然界中一种真实的存在，那么它是怎么形成的呢？关于这个问题，巴德和茨维基也作了预言，他们认

为超新星就是普通星向中子星过渡的联系环节。原来，当时的天文学家已经知道有一种称为新星爆发的天文现象。一颗似乎是普通的恒星会在几天之内亮度增加几十万倍，然后在一年左右的时间内恢复到原来的状态。但人们并不知道，这种现象实际上包括两种不同的爆发。巴德和茨维基首先认识到了这一点，他们把其中一类称为超新星，比起其它的新星，它们的光度还要大上千倍。这种超新星是天文学上十分罕见的现象，在我们银河系中几个世纪才能观察到一次。因此天文学家只能在河外星系中来寻找超新星，当它们爆发时，一颗星的亮度就可以和整个星系相等。而且在爆发中会有大量物质被抛出，产生一个扩张的气壳，成为明亮的星云。

因此，天文学家虽然在他的一生中很可能见不到一次银河系内的超新星爆发，但是他可以设法寻找超新星爆发后的遗迹——明亮的星云，来回顾当年爆发时的景象。金牛星座中有名的蟹状星云就是他们的观测对象之一。这个星云在法国天文学家梅西叶所编的星云状天体中名列第一。在望远镜中，它形如一只横爬的螃蟹，因此而得名(见图5.6)。早在1921年，就有人把蟹状星云的两张前后相隔十二年的照片相对照，发现星云正在膨胀。后来又有人根据它的大小和膨胀速度算出这种膨胀大约开始于900年前。因此，如果蟹状星云真是超新星爆发的遗迹的话，那么在900年前这里应当发生过一次银河系内的超新星爆发。

这方面的见证到哪里去找呢？1942年，有人提出，中国古代天文记录中有一个事件在时间和地点上都同这个假设的爆发相近。这就是公元1054年我国《宋史》上所提到的“客星”。记载是这样写的：“嘉祐元年三月，司天监言：‘客星没，客去之兆也。’初，至和元年五月晨出东方，守天关。昼见如太

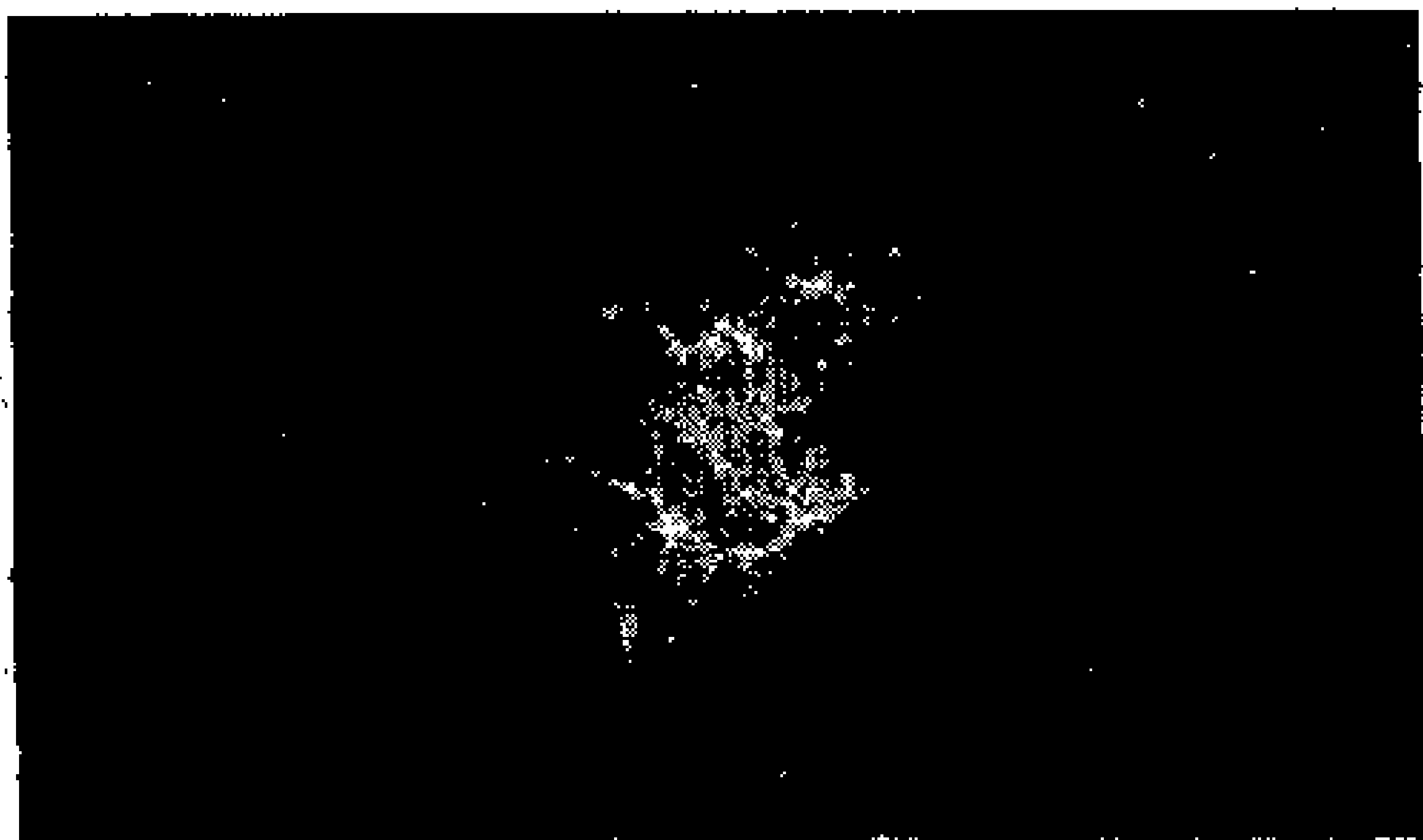


图5.6 蟹状星云脉冲星

白，芒角四出，色赤白。凡见二十三日。"记录说明的时间是1054年7月4日，地点是金牛座ζ星附近。所谓的"客星"亮到白天都能见，持续达二十三天，到第三年五月才消失。天文现象的变化大多要千百万年才会显出效果。而这颗星却在以年计的时间尺度上达到极盛而后衰减，真可以算是"昙花一现"了。而且它的亮度达到了白昼都能见的程度，可见这昙花又是宇宙中少见的一次蔚为壮观的焰火。从它的亮度变化，可以断定它确是一次超新星爆发。这样的爆发在人类的历史记载中不到十次。我们祖国的古代典籍中，保存了世界上最丰富的古代天文记录。它的关于超新星的记录，为验证现代天体物理的理论，认识恒星晚期演化，竟然作出了不寻常的贡献。

现在，我们可以来大体描述一番恒星演化到晚期而发生超新星爆发的过程了。恒星经过漫长的主序星阶段，终于耗尽了它的核燃料。核反应炉慢慢熄灭了，冷却了。这是什么意思呢？这意味着恒星内的元素差不多都变成了铁。因为铁的原

子核是一种结合得最紧的核，它的能量是最低的，比它轻的原子核相互结合成铁核，就有多余的能量放出来，这就是恒星能量的来源。但是要使铁核相互结合而成为更重的原子核，却不能放出能量，反而要外加能量。所以氢变成了铁，核燃烧就告终。白矮星的主要成分就是核燃烧的炉渣——铁。但是二倍太阳质量的恒星因为引力强大，还会继续收缩。当它的密度继续升高时，铁核便不再是最稳定的核了，它会同电子结合而变成含中子较多的核。由于电子同核的结合，承担恒星自身引力的支柱——电子简并压也消失了。当星的中心密度达到10^{11}克/厘米^{3}时，这种压力一下子消失。在几分之一秒钟内，星核中的所有电子和铁核都变成了含很多中子的核或自由中子，星体失去了支撑，处于自由落下的坍缩状态。急剧的收缩又使核心密度急剧上升。这时密度的上升导致了中子简并压异军突起，使坍缩的星体面临巨大的压力而猛然停住。自由落下的巨大动能以冲击波形式向外传出，同时转变为热，使星体达到上百亿度的高温。在如此高温和高密度下，基本粒子转化速度极快，巨大的热量转化为高能中微子。尽管中微子穿透力极强，在这样的极端条件下，它也只能走上几百米而不能逸出星体。所以坍缩释放的能量只能随中微子的扩散而转移到星的外壳中。星壳的温度上升到二千亿度之高，从而开始了爆炸性的核燃烧，放出更多的热能。由中微子携带和核燃烧产生的巨大能量使星壳变得连引力也束缚不住了，于是发生爆炸，以接近光速的速度把外壳向外炸开。膨胀的星壳的热能则转变为强烈的辐射。这辐射如此之强，在几十天以致上百天的时间内，可达到一个星系的光度。同时，大量核粒子在爆炸的冲击波中加速到极高的速度，成为宇宙射线的重要部分。超新星爆发时那种高温高密度，还为比铁重的元素

的合成创造了条件。重元素在超新星的爆发事件中被“炼制”出来，并被抛撒到太空中。当新的一代恒星和行星从星际物质中脱胎而出时，这些星球上便有了从氢到铀以至更重的全部元素。可以说，没有超新星的爆发，便没有重元素生成，也就不会有我们地球上今天这样的生命的发生和兴旺。所以说，超新星不仅仅是一场宇宙规模的精彩焰火表演，而且是自然界在物质循环中演化发展所不可缺少的一个环节。

宋史中记载的，显然就是这样一个事件。它所描述的白天都能见到的耀眼光芒，正是超新星爆发时的强烈辐射。今天所见到的膨胀星云，就是爆炸中抛出的星壳。

1968年发表了脉冲星被发现的消息之后，就可以检验巴德和茨维基的最后一项预言了：普通恒星在超新星爆炸后便形成中子星。如果脉冲星的本质真是中子星，那么在蟹状星云中，也应当有一颗脉冲星。果然，就在蟹状星云的中心附近，射电天文学家很快就发现了一个周期极短的脉冲星。它的周期只有0.033秒，是所有脉冲星中最短的一颗。过了几个星期，光学天文学家又发现星云中心附近有一颗星发出的可见光也有0.033秒的周期变化。显然，它们就是同一颗星。到此，三十多年前的预言被全部证实了。

脉冲星的辐射

我们现在来详细看一看，中子星是如何发射脉冲的。中子星是恒星坍缩而成的，根据大家熟知的角动量守恒定律，恒星坍缩过程中角动量是不会改变的，但中子星的尺度比原来恒星要小许多倍，所以它的角速度将会比原来恒星自转角速度大许多倍。计算证明中子星的角速度应为一秒左右转一周，这同观测到的脉冲星周期范围是一致的。在恒星坍缩为

中子星的过程中，磁场也会随星体而收缩，星体表面处的磁场强度将大大升高。我们知道恒星表面的磁场强度为几高斯到一万高斯不等，如果一个太阳大小的恒星表面磁场强度为一百高斯，当它收缩为半径 10 公里的中子星时，磁场强度将达到 10^{12} 高斯。那么大的场强比我们地球上所能产生的最高磁场强度要大一百万倍。那么高的场强已根据对 X 射线脉冲星的能谱的分析得到证实。X 射线脉冲星是一种在 X 射线波段发射脉冲的星，在下一章还会提到它们。它们也是中子星。例如武仙座 X-1 是一个 X 射线脉冲星，其表面磁场据分析应达到 5×10^{12} 高斯。电子在磁场中将按螺旋线前进，同时发出同步加速辐射。这种辐射是沿电子轨道发射的有很强方向性的一种非热致辐射。在磁场达到 10^{12} 高斯这么大的中子星上，电子的螺旋轨道几乎被磁场拉直了，电子几乎是沿磁力线高速运动。在磁场最强的两极处，电子则沿磁力线呈射束向远处喷射，它们所产生的同步加速辐射也是在此方向上射出的，形成为一个细射束。一般的中子星磁轴是不同自转轴重合的，因而当中子星自转时，这个细束象探照灯光一样扫过空间。当它扫过我们的望远镜时，便形成一个脉冲信号，中子星转一周，射束也在空中扫一圈，因而脉冲信号的周期也就反映了中子星的自转周期（见图 5.7）。观察发现，在一个周期的时间内，脉冲只占百分之三到十的长度，其余大部分时间无信号，这是符合上面的模型的，说明只是极区有细束，并不是整个星都有发射。脉冲星的发射除了这种短周期的规律性外，还有长周期的变化，例如有的脉冲星有六十天的周期性变化，这可以用中子星自转轴的"进动"来解释，也就是说中子星的轴会象快转的陀螺的轴一样，在空中画一个圈。因此它的射束与我们的视线的倾角会发生变化，从而造成了

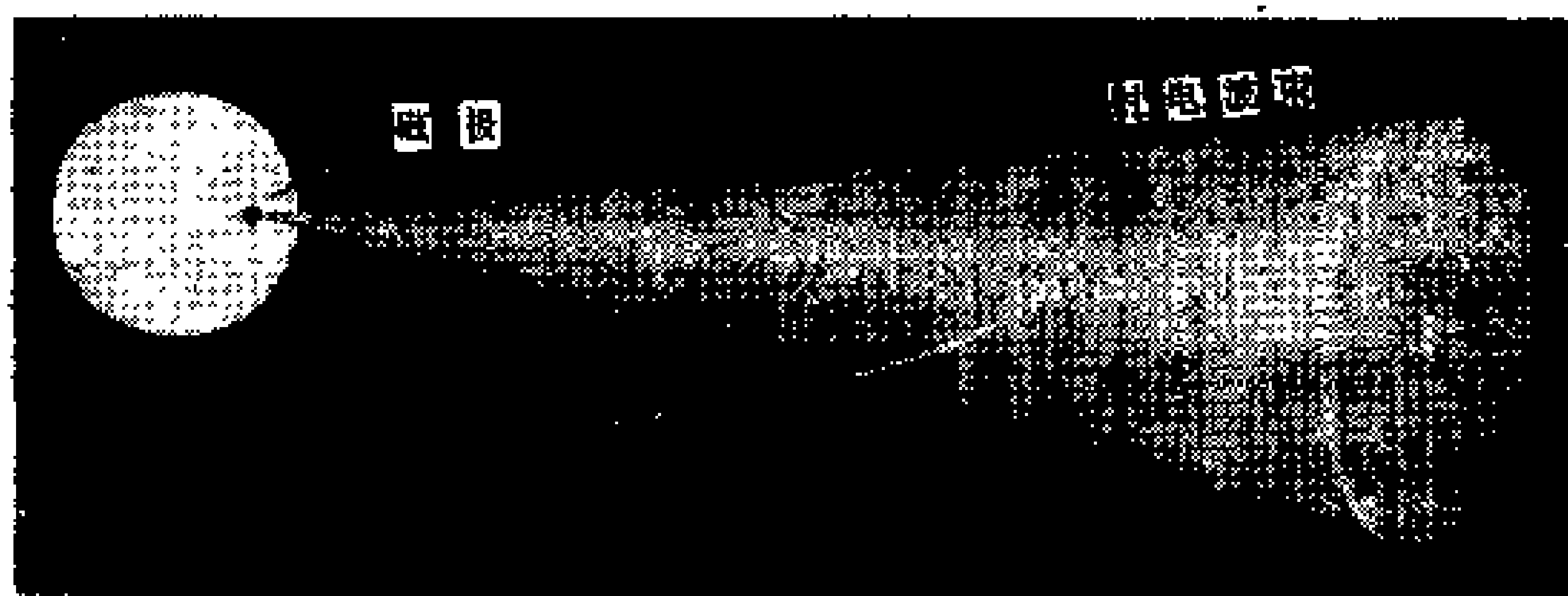


图 5.7　脉冲星的发射区绕轴转动，它的射束也随着扫过天空

这种长周期的强度变化。

脉冲星的脉冲周期以其高度稳定性著称，它来源于中子星自转的稳定性。但它们并不是十全十美的钟，而是在逐渐慢下来。当然，这种减慢是很不明显的，只有非常精密的测量才能揭示这一点。例如有的脉冲星每天中周期只加长 1.5×10^{-13} 秒！

既然脉冲星的自转在变慢，那么从它的周期长度也可以推测它的年龄。蟹状星云脉冲星的周期是最短的，说明它是一颗十分年轻的中子星，它的周期每天增加 35 毫微秒，由此可以算出它的年龄是 1000 年左右，同其它方法的结果是接近的。顺便指出，船帆座中有一颗脉冲星，周期是 0.089 秒，仅次于蟹状星云脉冲星，年龄也较长，约 10000 年左右。它的可见光发射已经变得很弱了。周围的星云也显得很大。它离我们比蟹状星云近四倍多。可惜 10000 年前人类还没有记录，否则的话，他们将告诉我们当时的景象——天空中出现了一颗满月一样明亮的星！

别看脉冲星的自转周期变化是那么细微，却是脉冲星辐射能量的来源。中子星内已停止了核反应，它的辐射能量从

哪里来呢？当星体在引力作用下坍缩时，星体自转加快，原来的引力能就转化为星的转动能。当这种转动逐渐慢下来时，能量又转化为磁场中的高能电子，同步加速辐射的能量就是这样来的。至于转动能具体是如何转化为电子的能量的，目前还没有统一的看法。一般认为这与中子星周围存在着极高的磁场有密切的关系。但不管以什么方式转化，根据计算，自转减慢放出的能量，确实能够维持实际观测到的脉冲星辐射。

中子星的构造

脉冲星自转除了逐渐的减慢之外，至少在一部分脉冲星中还观察到突然性的加快。第一个例子是1969年9月在那颗船帆座脉冲星中发现的。它的自转频率突然增大了百分之一。对于周期准确性达到十亿分之一以上的脉冲星，这个变化可以算是一场轩然大波了。此变化好比是给急转的陀螺加了一鞭似的，使它突然加快了许多。它是怎么发生的呢？有一种意见认为，这是“星震”造成的，星震就是中子星的外壳发生突然的断裂和变形。计算表明，船帆座脉冲星的直径只要改变一厘米，就足以造成观测到的频率增大现象。正象地震波的探测可以告诉我们地球内部的情报一样，这种星震造成的转动加速也能告诉我们许多中子星内部的状况。

自从脉冲星发现以后，引起了一些固体物理学家的兴趣。因为中子星物质是恒星核燃烧以后剩下的“炉渣”，只能靠原来留下的余热打发日子，它们的性状同接近绝对零度的普通物质很相似。还有许多奇异的性质。

根据理论的计算，这个奇异世界的最外层，是铁壳。铁壳的密度还不十分大，所以电子还没有脱离原子。由这种铁元素及其它一些元素组成的物质是一种晶体。有人认为，这种

晶体的刚性比钢大 10^{18} 倍，抗压缩性比钢大 10^{20} 倍，导电性比铜好 10^5 倍。再往深处，由于密度越来越大，电子被压到核内，与质子结合而成中子。一定深度以下，电子和质子全部消失了，剩下的只有一片中子的海洋。“中子海”是中子星的主体部分，密度为 10^{15} 克/厘米^3。有趣的是，这样高密度的物质却能象处在接近绝对零度的液态氦一样，表现出超流动性。至于在更深处，中子也许会形成固态的晶格。在核心甚至可能是超子构成的物质(见图 5.8)。

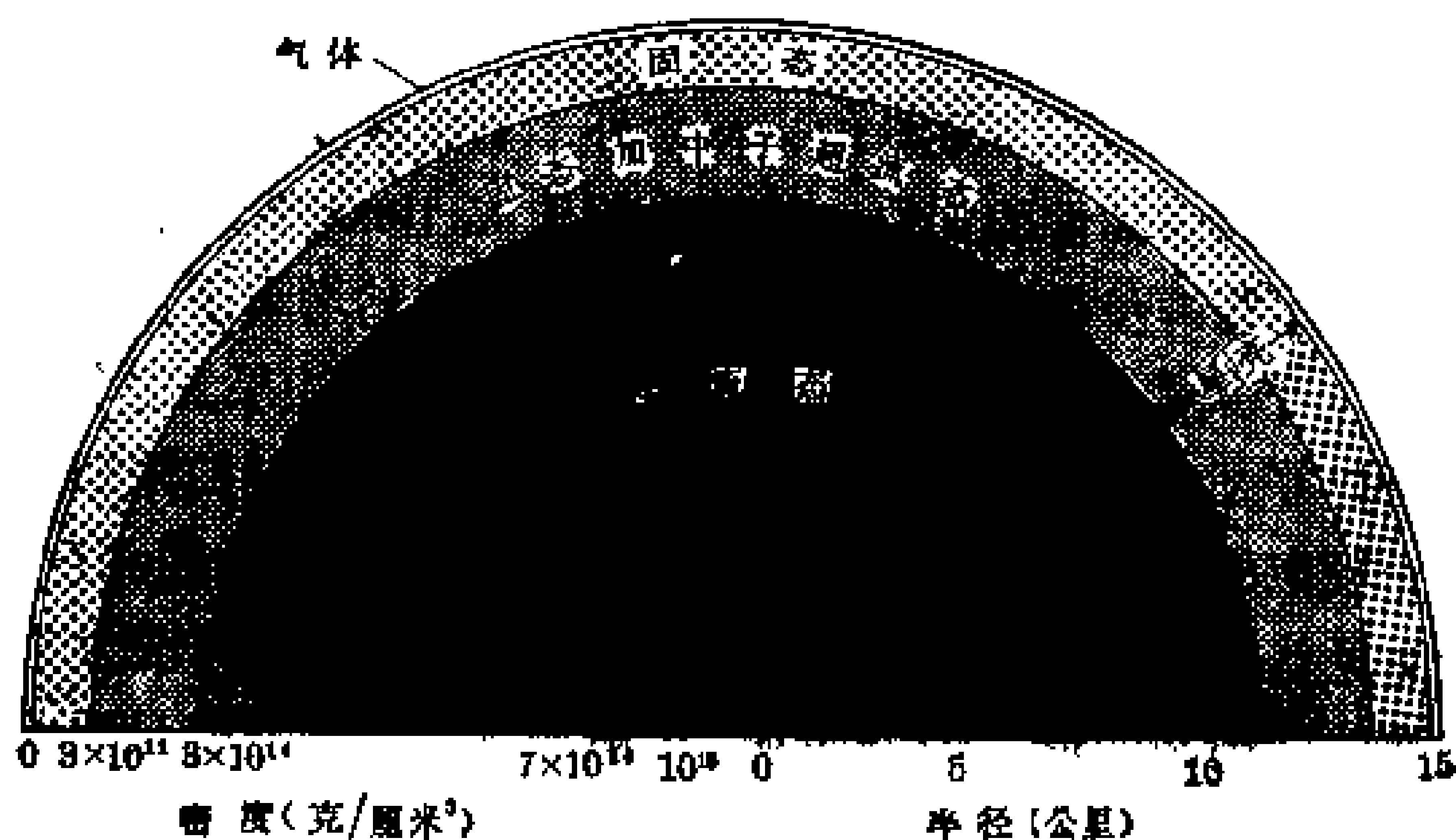


图 5.8　中子星剖面图。中子星的核心状态还不完全了解。核外部是中子超流体，中子星的外壳是固体，它的刚性比钢大 10^{18} 倍

用上述模型来说明星震现象是很成功的。例如以蟹状星云脉冲星为例，由于它十分年轻，其核心区还没有形成固态中子晶格，可以认为是一种鸡蛋一样的构造，外边一层硬壳，内部是流体。高速自转使它成为一个扁球。随着转速的减慢，它的扁的程度会减小，到一定程度使外壳破裂，调整为更接近球形，这时便出现自转突然加速现象。外部的加速转动通过流体慢慢向内传递，使内部也加快转动。角动量的传递速度

同星内的流体性质有关，如果是普通的流体，则传得很快；如果是超流体，由于它几乎没有粘滞性，角动量传递很慢。观察脉冲星突然加快以后的恢复过程，发现同超流体的传递速度相符。在蟹状星云脉冲星这种情况下，外壳只要收缩10微米，就能说明它的周期变化了。船帆座脉冲星年龄较大，它的核心部分会形成固态中子晶格，成为典型的中子星结构。这样的模型同样能圆满地解释它的周期变化现象。

我们看到，中子星的超密态为我们提供了多么特殊的环境：强大的磁场、巨大的压力、高速的转动。这一切都是地球上无法实现的，甚至也是不久以前所不敢想象的。可以毫不夸张地说，中子星是一个宇宙的天然实验室，它为各个领域的物理学家提供了地球上所没有的从事科学实验的极端条件。

第六章　引力坍缩　黑洞和 X 射线密近双星

上一章里，我们根据恒星内部引力与斥力的消长与平衡，讨论了晚期恒星的演化问题。我们看到质量较小的恒星自引力也就较弱，靠电子简并压即可以抗衡其自身的引力，从而成为白矮星。如果恒星的质量超过一定的界限，那么它便会强烈地收缩到核物质密度的高密状态，依靠从这种状态下产生的中子简并压来抗衡引力的收缩作用。喜欢寻根究底的读者也许会问，中子简并压是否能顶住最强的引力作用呢？白矮星和中子星是否就是一切恒星在走向死亡时的最后归宿呢？

对于这个问题，美国的奥本海默等人早在 1939 年根据理论上的推算，已经作过初步的预言。六十年代，由于类星体等天文现象的发现，向人们提出了许多高能天体现象中的能源问题。在这种要求的推动下，物理学家、天文学家和数学家对物体在自身引力作用下的一种猛烈收缩过程——引力坍缩作了广泛深入的研究，所得的结果对天体物理学、以至整个物理学产生了巨大的影响。

引 力 坍 缩

生活在宇宙航行时代的我们，对于“逃逸速度”这一名称都是不陌生的。它就是地球表面上的火箭要飞出地球的引力控制所必须具有的速度，其大小为 11.2 公里/秒。我们关于引力坍缩的话题就从这里说起。假定地球的半径由于某种奇

迹缩小到原来的四分之一而质量不改变，那么其表面的引力场就会增强到原来的十六倍。火箭要逃出这个变小了的地球的引力场所要的动能就要增大到四倍。而动能是与速度平方成正比的，所以所要求的逃逸速度是22.4公里/秒。为了理解引力坍缩，我们不妨作一番异想天开的假设，把地球的周长从40000公里缩小到10公里。这时火箭的速度要大到708公里/秒才能逃出地球。如果进一步把周长缩小到5.58厘米，则逃逸速度就达到了光速——每秒三十万公里。这时不要说火箭，连自然界中速度最高的光也逃不出弹丸大一般的地球的引力束缚了，地球上的任何信息都不可能送到外界去了。从外面的世界看来，它已经死去了，只留下一个周长为5.58厘米的墓穴。

当然，在地球上是找不到一种办法可以把地球这么个庞然大物压缩到弹丸那么小的。我们不必担心人类会成为地球坍缩时的殉葬品。不过广阔宇宙中无奇不有，我们已经看到直径只有几十公里、密度达到10^{15}克/厘米^{3}的中子星在自然界里普遍存在。怎么能设想，这些数字会成为禁线，不许自然界突破呢？事实上，科学家的计算表明，恒星质量如果超过大约三倍太阳质量，那么中子简并压也不能抵抗它自身的巨大引力，将会继续自动地收缩下去而走向最后的墓穴——这就是无限引力坍缩。

这样形成的墓穴，是一个无底洞，因为它的强大引力会把一切掉进去的物质和辐射吞下去，再也不会让它们跑出来。由于所有的光线只能进不能出，所以它是黑的。于是人们给它取了个名字，叫做黑洞。黑洞的边界也就是外界观测者视线的边界，所以叫做视界。黑洞的半径叫做引力半径。引力半径是同质量成正比的。太阳质量的物体的引力半径是2.9公



图 6.1　太阳目前半径约 700000 公里，约五十亿年后，它将坍缩成为白矮星，半径只有 6000 公里，如果它能进一步成为中子星及黑洞，则半径将进一步收缩为 10 公里及 3 公里，图中分别是它们的相对比例

里（图 6.1），它收缩到这么大时的密度达到 2×10^{16} 克/厘米^3，是核物质密度的 50 倍。在如此高密度、强引力的条件下，牛顿的传统的引力理论已不再适用，而应当改用爱因斯坦（图 6.2）的广义相对论。但是，早在 1798 年，法国著名的科学家拉普拉斯根据牛顿的引力理论就猜测过黑洞的存在，他写道："天上最明亮的天体，可能是看不见的。"他计算出，一个直径比太阳大 250 倍而密度与地球相当的恒星，其引力之强就足以捕获住它发射的所有光线，从而切断了与外界的通信联系。

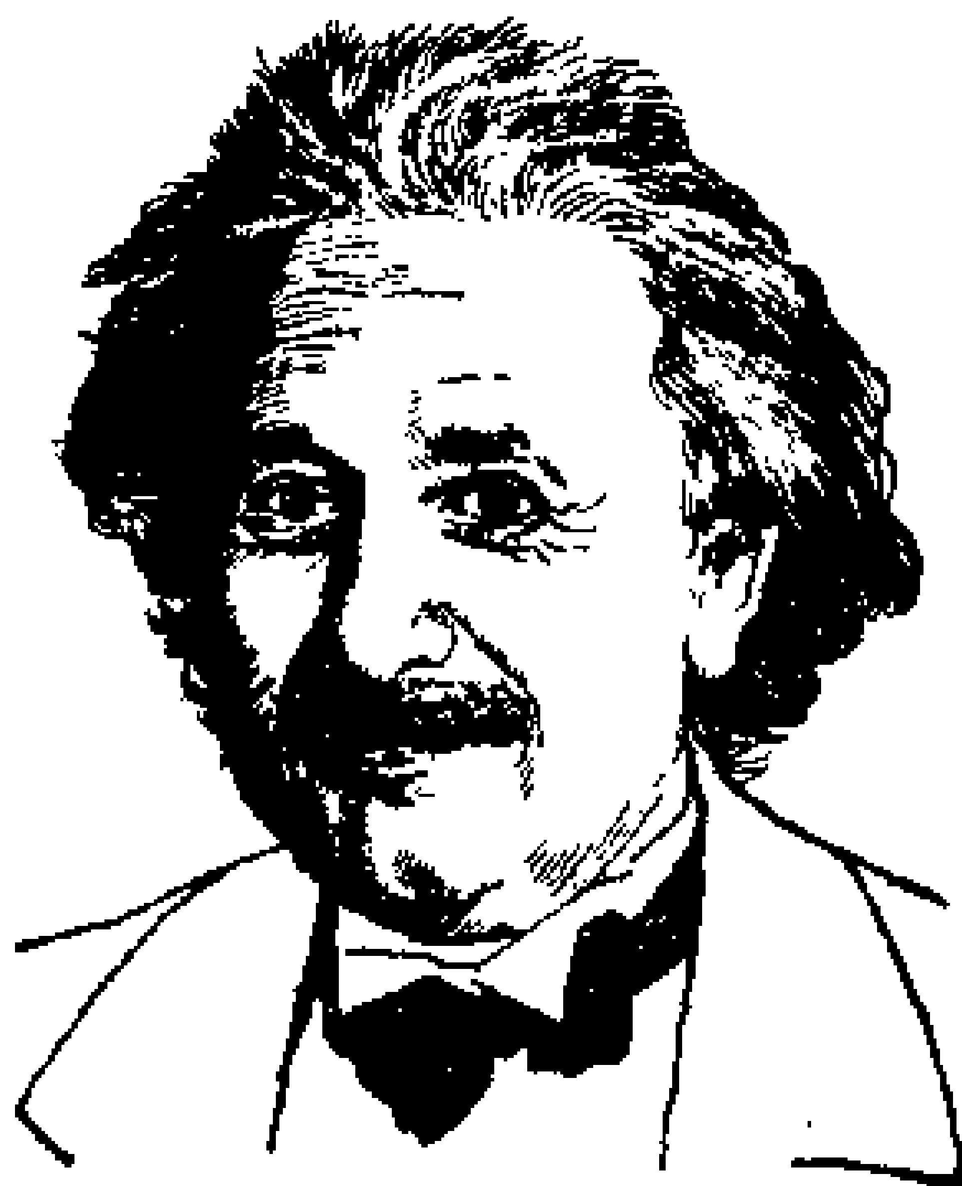


图 6.2　伟大的物理学家爱因斯坦
(Albert Einstein, 1879～1955)

我们以一颗十倍太阳质量的恒星为例，来看看它在发生

引力坍缩时，将会发生什么情况。这颗星经过约三千万年的核燃烧，核燃料已经烧尽，于是发生引力坍缩。由于它质量很大，电子和中子简并压都遏止不住这样的坍缩，坍缩由慢变快。由于恒星表面引力场强的增高，根据业经证实的广义相对论预言，星表面上以某个角度发出的光会沿弯曲的轨迹运动。随着坍缩的进行，轨迹的弯曲会愈益严重。在星收缩到1.5倍引力半径之前，星表面发射的光都能逃脱到外界空间中。但是在此之后，表面上按切线方向射出的光将被俘获在星上空的一层球状云中，然后再慢慢泄漏出去。所以远处的观察者在坍缩过程的以后阶段，始终能看到这个星在1.5倍引力半径时的光圈。当星体继续坍缩进入引力半径时，便没有光子可以逃出去了。但远处的观察者并不会看到它突然消失，因为当这颗星进入1.5倍引力半径以后被俘获在光子云中的光还在逐渐泄漏出去。而在星进入引力半径前夕垂直于星面发出的光也在冲破引力的束缚，慢慢泄漏出来。而且这部分光中，因为后离开星的光子要摆脱较强的引力，从而失去较多的能量，所以看起来会越来越红。总之，尽管这颗星以很快的速度发生坍缩，但对于远处的观察者来说，它似乎被“冻结”在引力半径外一样，总能看到它进入引力半径前的样子，在1.5倍引力半径处，则是看到它进入这个范围时的样子。不过光的强度衰减得很快，所以实际上将看到这颗星在逐渐变暗变红的过程中消失了。

关心这颗星命运的人会问，它进入引力半径之后，将发生什么情况呢？现有的物理学理论只能告诉我们，引力半径内的物质和辐射将会被无穷大的引力压缩到无穷大的密度，这就是所谓的“奇点”状态。一个理论如果出现了“奇点”，就意味着它的破产。这说明，在奇点附近这样的极端的物理条件

下，我们现有的理论是不能应用的，必须用新的理论来描述。于是，我们看到，关于引力坍缩的研究把物理学推到了最前沿，成为人们探索更普遍适用的物理学规律的一个推动因素。不过应当说明，这样的新理论应用于引力坍缩时，它仅仅只能影响奇点附近的情况。上面介绍的大部分坍缩过程是不会因此而改变的。

黑洞何处寻

引力坍缩的产物——黑洞是否只是一种理论上的推论呢？我们看到，大质量的恒星在其晚期演化中，似乎是免不了要成为黑洞的。另外，近年有人为了解释类星体、星系核中的一些巨大能量的释放过程，认为在星团、星系核和类星体中也存在着黑洞。这种黑洞的质量将有上万个以至几亿个太阳的质量。如此巨型的天体虽说具备黑洞的一切性质，但其密度却并不是很大的。这一点其实不难理解，黑洞的质量是随半径成正比增大的，但它的体积则是与半径三次方成正比的。所以密度反而与半径平方成反比，也就同质量平方成反比。一个一亿倍太阳质量的大黑洞的密度只不过与水的密度相等。照此推理，我们现在所能观测的范围大约是一百亿光年，以这么大距离为半径的一个黑洞其密度将是非常小的，同实际观测到的平均密度值相差不多，所以有人甚至认为我们所观测得到的这一部分宇宙也是一个大黑洞。对于这个问题，因为目前的观测到的密度值尚有很大的不确定性，所以还无法下结论。如果结果是肯定的，那就是说我们也是置身在一个大黑洞中。

前面已经说过，质量不大的恒星是不会坍缩为黑洞的，但是，如果我们的宇宙在其演化的历史中经历过一个超密态的

阶段，那么当时炽热致密的介质中有可能出现受压缩的区域，这种区域坍缩将会形成比太阳质量小得多的黑洞。例如形成一个小行星质量（十亿吨）的黑洞，这样的黑洞大小只有中子或质子那么大。它们中的有一些可能正在太阳系和银河系中游荡。

这形形色色的黑洞，给天文学家提出了严重的挑战：在广阔的宇宙空间，找出黑洞来！六十年代以来，许多科学家朝这个方向作了大量理论和观测工作。有的科学家根据星系核的大规模爆发推断其中会形成巨型黑洞。如果这是正确的话，我们银河系核心可能也存在着黑洞，因为银河系核在很久以前也曾经历过爆发的阶段。今天的黑洞就是当初猛烈演化过程的坟墓。我们银河系中的这样一个黑洞质量将为一亿倍太阳质量，周长二十亿公里。它会从周围吸收气体，气体螺旋形地掉入黑洞，可能会形成一个环状的吸积盘。根据计算，这样的盘会发出强大的无线电波与红外辐射。观测表明，我们的星系核中确实有若干明亮的红外和射电“星”，可惜对此现象，别的非黑洞解释也能说明。因此银河系核中的黑洞仍是一个悬案。

1978 年，两组天文学家对椭圆星系 M87 作了仔细研究，得到了振奋人心的结果。M87 是室女座大星系团中最亮的一个星系（见图 6.3）。它离我们五千万光年，质量等于银河系的一千倍，是一个超巨型椭圆星系。它在 X 射线和无线电波段上发射能量。一组天文学家测定了 M87 的亮度分布，确证它中央有一个明亮的核，其直径不到三百光年；这是一般椭圆星系所没有的。另一组天文学家测定了 M87 的光谱谱线宽度，该宽度标志了星系中恒星的运动速度。他们发现恒星在核心区速度很大，只有中心的巨大质量才能吸引住它们。另

外核心部分的质量与光度比值也比正常星系大10倍，这说明有大量质量是不发光的。上述种种现象只要在普通椭圆星系的核上加一个黑洞即可解释，这个黑洞在核心的三百光年之内，约为五十亿倍太阳质量。进一步计算表明，朝这样的黑洞落下的物质很容易提供M87实际发射的X射线及无线电波能量。至于这些黑洞从何而生，有的主张是恒星坍缩成的黑洞相互并吞而成的。也有主张是超密阶段生成的小黑洞在当时环境中被强迫“填充”而长成的，小黑洞好比种子一样，在周围生长出星系和星系团。尽管这些主张未必都是对的，但M87的实际行为却是令人鼓舞的，它表明星系一级的黑洞的存在有很大可能，为爆发星系、类星体核的黑洞模型提供了旁证。这一点在以后还要谈到。

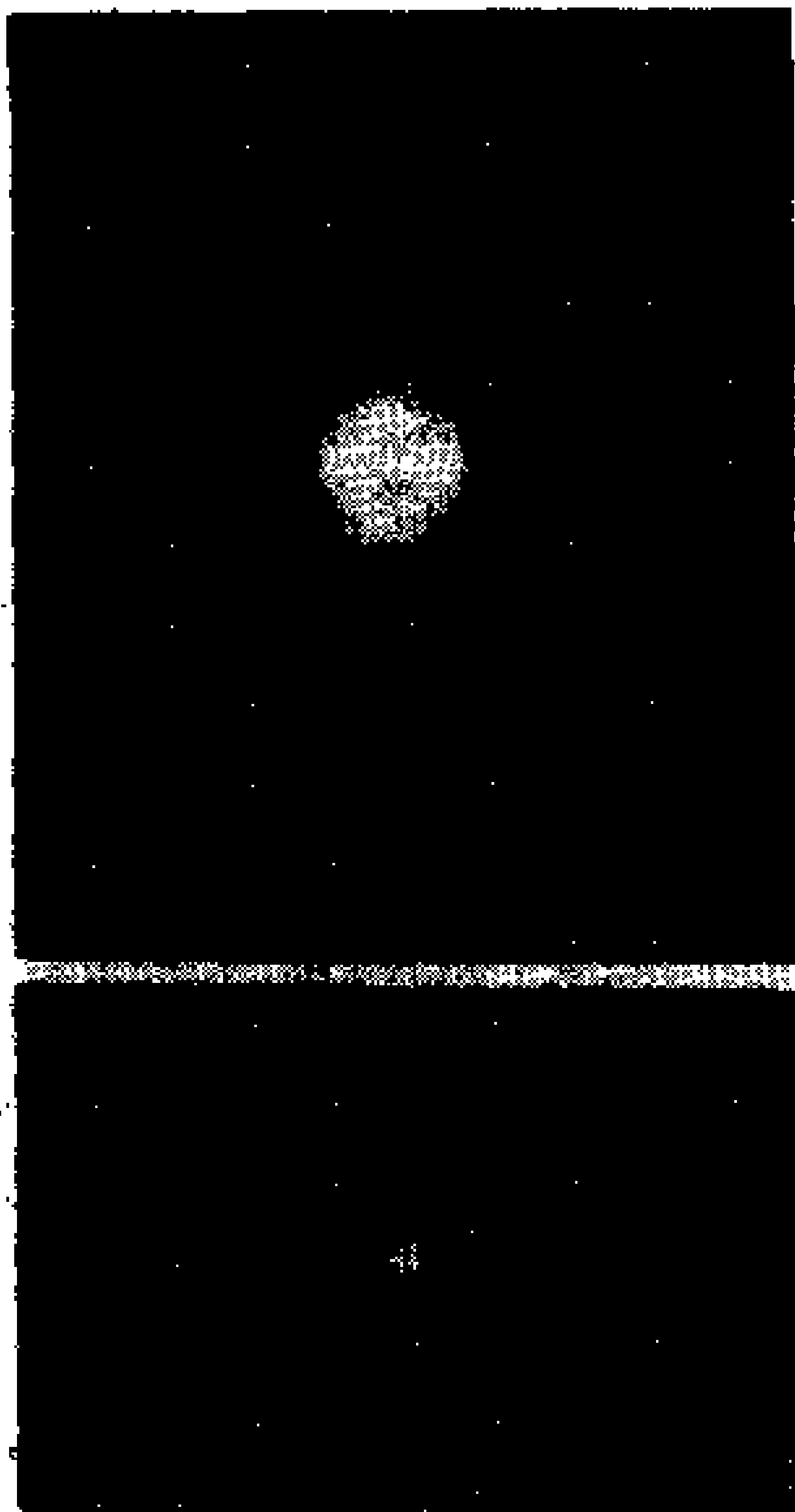


图6.3　巨型椭圆星系M87是已知最明亮的星系之一。从短时间曝光照片上看，它有一股长达6000光年的明亮喷流。近来的研究表明，其中心有一个致密天体，质量为五十亿倍太阳质量，可能是一个黑洞

我们的银河系中有几百个球状星团。球状星团是银河系

中最古老的天体。平均每个星团约十万颗星。近年来，大气层外的 X 射线观测表明，球状星团中出现 X 射线星的比例很高。这种 X 射线星发射功率极大，可达到太阳在全波段上总发射功率的几千倍。为了解释球状星团中出现的 X 射线星，人们提出双星模型和大质量黑洞模型。关于双星中黑洞产生 X 射线的模型，我们将在下一节里详细讨论。这里先讨论大质量黑洞模型，这种假说认为星团核心十分稠密，经过引力坍缩，其中的恒星会合并而成为黑洞。黑洞的引力场俘获恒星风和正常恒星发出的物质，在其自身周围造成一个沿螺旋线掉向中心的物质的吸积盘，从而物质在掉入黑洞时释放的引力势能转化为几百万度高温的热，以 X 射线形式发射出来。该模型中的黑洞质量必须很大(一百到一千倍太阳质量)，才能捕获稀薄的星际气体。这样的假说遭到一些人的反对，但仍然有一定的证据支持它。例如，发现球状星团 NGC6624 中的 X 射线源会发生短暂的爆发现象，爆发的总能量估计为 10^{39} 尔格。爆发在不到一秒的时间内上升到最高强度，然后在 10 秒内逐渐下降。这现象可以认为是爆发发出的 X 射线光子在等离子云中受曲折散射而造成的。根据 X 射线能谱，又知道 X 射线光子在这种云中散射时会获得能量，由此可推断等离子云温度很高，但如此高温度的云，只有中心天体为 1000 倍太阳质量时才能使它们不致散开，这样的天体只能是黑洞。另外，根据大型光学望远镜的照相，看出这个星团中心在直径只有一光年的区域中聚集了许多红超巨星，考虑到还有许多昏暗的看不见的星，中心密度大约是每立方光年 3000 个太阳质量。如此稠密的中心，是大黑洞存在的良好环境。当然，下结论为时尚早，但存在大质量黑洞的可能性正在吸引人们去作进一步的精密观察。

最后，要谈一下对于在宇宙的超密时期形成的小黑洞的探寻。尽管还刚刚从理论上加以猜测，但因为根据我们将在本章最后一节讲到的量子力学规律，小黑洞会发射光和粒子而逐渐消亡掉，因此探测它的存在及其发射，不仅能证实黑洞的存在与否，而且也能检验新发展的黑洞的量子力学的正确与否。所以观测工作已经开始。根据理论预言，质量小于10^{15}克的小黑洞到今天都已消失了，质量10^{15}克到10^{16}克（一座小冰山的质量）的小黑洞正在走向死亡。这种死亡过程是很迅速的，最后将以猛烈爆炸告终。爆炸放出的能量非常巨大，相当于千万个氢弹。能量以高能γ射线的形式放出。要检测到这种γ射线，或者需要将大型探测器送上天，或者可以根据这种射线穿过大气时产生正负电子对，电子对又会产生切仑科夫辐射的现象来进行。切仑科夫辐射是一种可见闪光，能够检测到。初步实验表明，在我们的附近区域中小黑洞爆炸不超过每世纪每立方光年两次；或者说，小黑洞密度小于每立方光年一亿个。应当指出，这些估计还同采用的基本粒子理论有关，所以小黑洞的探测还可以对不同的基本粒子理论作出判决。当然这些都是十分初步的工作，理论和实测都有待于发展。

天鹅座 X-1 的特征

巨型黑洞和小型黑洞固然引起了不少人的兴趣，但是它们是否存在的最后结论，看来还需要相当一段时间才能作出，因为在自然界中究竟能不能存在这种黑洞，如果能的话又是怎么生成的，诸如此类的根本性问题还没有得到解决。对比之下，我们对于恒星坍缩而成的“常规”黑洞，则要有把握得多。因为中子星已经公认是存在的，那么大于三倍太阳质量

的恒星在坍缩时除非能设法抛掉多余的质量，否则是不可能稳定为中子星的，看来，它很难逃脱成为黑洞的厄运。在实际的观测方面，形势也很有利。至少有一个天体——天鹅座X-1，已经为多数科学家承认为黑洞。当然，象所有的科学发现一样，这个天体的发现和确证，并不是一帆风顺的。

我们先从对这类恒星级黑洞的寻找谈起。黑洞是看不见的而且尺度很小的天体，所以直接的观测将是很困难的。如果黑洞有一颗能够观测得到的伴星，那么根据黑洞对它伴星的影响，也许能推断黑洞的存在。所以1964年起，就有人在双星系中寻找黑洞。双星系中的两颗星绕公共质心转动，根据多普勒效应，星转向我们时，谱线发生向蓝端的移动；离开我们时，发生红移。如果观察到双星系中一颗星发生红移时，另一颗星发生蓝移，说明两颗星都发光，那当然不会有黑洞。如果只有一颗星的谱线移动，那么就有希望找到黑洞。由于黑洞的质量要比三倍太阳质量大，所以可见伴星的多普勒移动量有一定的要求，不能太小。但是仅根据光谱，是很难判断黑洞是否存在的。幸而那时人们又知道，在密近双星系中的黑洞的强大引力场能把气体从伴星那里吸过来，这些气体落进黑洞时会发热到能发射X射线的程度。所以X射线将是判断黑洞存在的强有力证据(见图6.4)。

但是X射线是不能穿透大气层的。必须依赖卫星上的X射线探测器。1970年发射的"乌呼鲁"卫星已发现了一百多个X射线源。其中有六个看来位于双星系中。于是人们的注意力便集中到这些X射线源上来了。

这六个源中有两个源发射极精确的X射线脉冲。黑洞是不会产生这样的有规律现象的。而中子星恰好具有这种性质。一般认为，气体沿中子星强磁场的磁力线落到磁极上时，

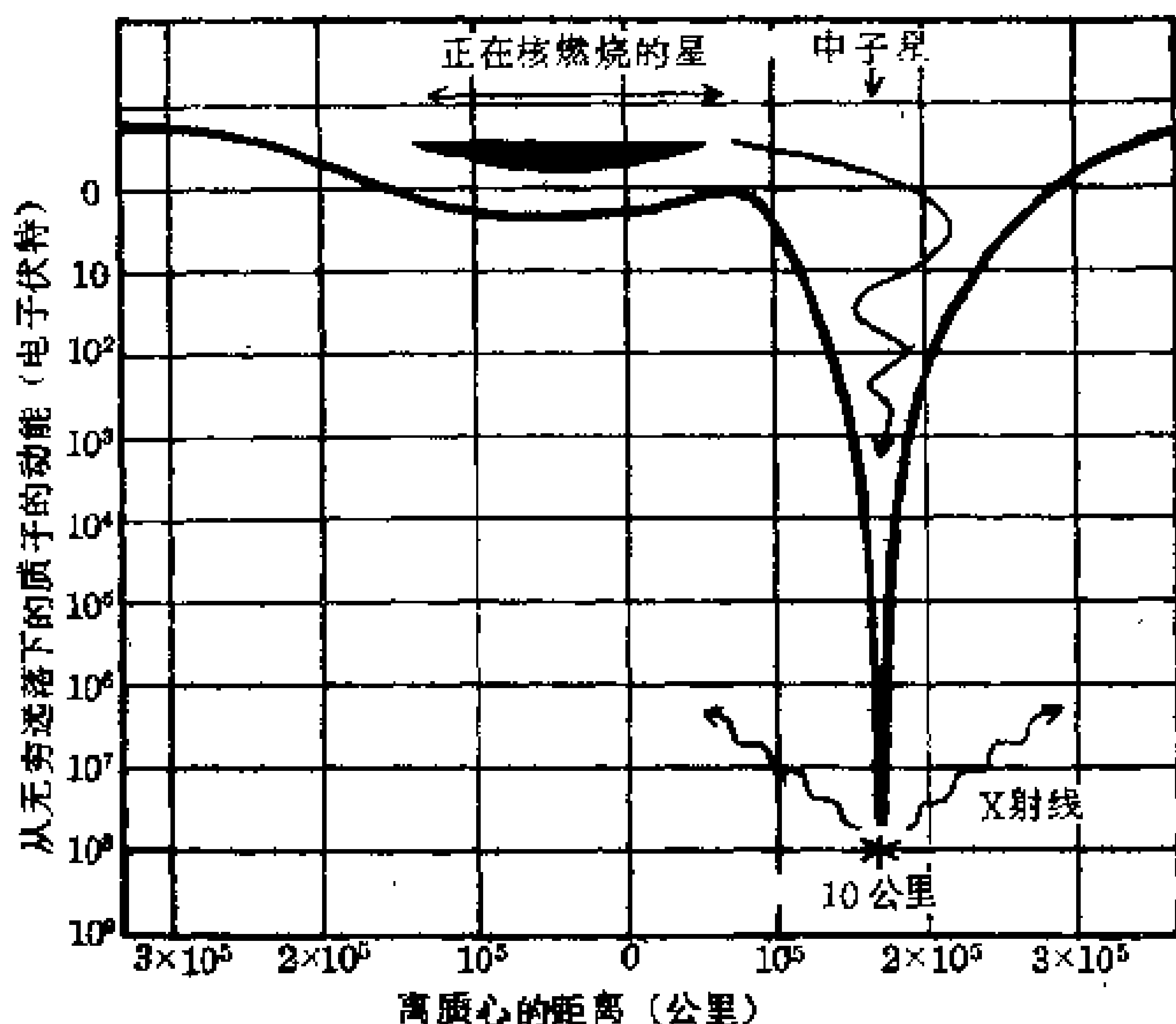


图6.4 X射线双星的势能图。仍在进行核燃烧的星具有宽而浅的势阱。另一个深而窄的势阱是中子星的。气体从大星落到中子星上，每个质子可获得一亿电子伏的能量。这些能量最后以X射线的形式发射出来

会碰撞发热而发出X射线。该射线束随中子星自转而扫过天空，便在我们的记录仪上产生一个个X脉冲。于是可能有黑洞的X射线双星系就只剩下四个了。根据光谱的多普勒移动等观测资料，又发现其中天鹅座X-1的质量为太阳质量的八倍，其余的都不到三倍。由于估计十分粗糙，对这些数字不同意见是很多的。不过对于天鹅座X-1，即使作最苛刻的估计，也很难使它质量降到四倍太阳质量以下。所以天鹅座X-1成了黑洞的最有希望的候选者，人们纷纷把注意力集中到它的身上。

为了鉴别一个X射线源究竟是不是黑洞，首先要了解，从被黑洞吸积的气体中发出的X射线应有哪些与众不同的特征。这一点，1971年来，许多科学家就根据爱因斯坦的广义相对论作了研究和预言。他们指出，受黑洞吸引的气体首先会形成一个旋转的扁平圆盘，就好象土星的光环一样。气体在这种吸积盘中按螺旋线向内降落，最后掉入黑洞。气体刚进入吸积盘时，温度是两万多度，也就是黑洞的伴星的表面温度，因为这些气体就是那里提供的。气体在吸积盘内运动时会受到粘滞作用而加热，使温度上升到一亿度以上，从而发出X射线。这就是我们所探测到的X射线。气体在进入黑洞前夕的轨道周期大约为一毫秒，但是中子星那种真正的严格周期性这时是不会有的，因为黑洞没有硬的表面。实际观测证实了上述看法。根据装在火箭上的大型X射线探测器对天鹅座X-1的观测记录，确实有时间尺度约一毫秒的爆发，爆发时强度增大十几倍，看起来就成为快速的闪烁。但这种闪烁中并没有什么严格的周期性，正如预料到的一样。

与此同时，光学望远镜在天鹅座X-1方向上观测到一颗亮度为9等的双星，双星绕转周期5.6天，称为HDE226868。经过精密的方位测定发现，它可能就是天鹅座X-1中与X射线源为伴的可见星。而且在这个方位上还有一个射电源，射电源强度在一段时间内逐渐上升，与此同时X射线源的强度下降了四倍，这样的同时性看来也不是巧合。1972年8月哥白尼卫星上天了，它在天鹅座X-1的X射线强度中发现了以5.6天为周期的变化，看来这是X射线源受到周期性的遮掩造成的，但因为X射线穿透能力弱，所以不容易发现。通过在X射线、可见光和射电三个不同的波段的相互印证、对照，可以断言它们都来自同一个双星系。从光谱的比较分析，还

看出有迹象表明气体正从可见星流到它的伴星上去。计算还表明，可见伴星是一颗超巨星，质量为三十倍太阳质量，而X射线源质量应为六倍太阳质量。这就证实了原先的初步估计。

我国的科学家对天鹅座X-1的研究也作了有价值的工作。中国科技大学天体物理研究室的研究人员考察了在黑洞附近的高温下电子对的产生所造成的影响，结果同实际观测到的高能X射线发射很强这一事实是吻合的。这对天鹅座X-1的黑洞本性似乎也是一个支持。总之，相信天鹅座X-1是黑洞的人越来越多。当然持谨慎态度的人也是有的。科学毕竟不能有半点含糊，最后的裁判者只能是事实本身。

1978年，又传来消息说，哥白尼卫星又发现了一个类似的X射线源——天蝎座V861，它比天鹅座X-1稍近，也是一个双星系，这个双星系的成员之一也是一颗超巨星。紫外观测表明，超巨星的物质正以每秒800公里的速度流出，掉进伴星。根据计算，这颗伴星质量约为太阳的12倍到14倍，至少也得5倍。这样，就又多了一个黑洞的候选者。

没有最终的归宿

黑洞的研究，除了指导实际的观测以外，对于物理学的理论也有重要意义，所以我们还要再谈一点黑洞的理论。一个黑洞，它应当具有什么性质呢？说来很奇怪，黑洞这样一个超出常人想象的物体，性质非常简单，它可以用其质量、电荷和角动量来表征，也就是说告诉你一个黑洞的这三个量，黑洞也就完全确定了。如果两个黑洞的质量、电荷和角动量完全相同，那么这两个黑洞就是一模一样的。这么看起来，黑洞确实十分简单，比如说，比我们人就要简单得多。对某个人，如果

只告诉你三个量，如年龄、身长和体重，那无论如何是不算对他的全面介绍的。而黑洞却只要用三个量就可以完全决定了，它就象一个光秃秃的圆球一样，没有其它特征。这个结论也叫做“黑洞无毛发”定理，是六十年代末、七十年代初由科学家从广义相对论出发加以证明的。该定理意味着，引力坍缩前千差万别的物体，坍缩为黑洞之后便“玉石俱焚”，各自的细节和相互的差别全都消失了，对外界观测者来说，只保留了质量、电荷和角动量这三个性质。我们无法根据黑洞的现状来推断它坍缩前的具体性状，因为那些性状都被冲刷掉了。

黑洞还有一个特别的行为，就是当两个黑洞相撞而合二为一时，合成的黑洞的视界表面积一定不小于原来两个黑洞视界表面积之和。这种黑洞的合并还会释放出能量，释放能量的效率比最强的核反应还要高一百倍。合成后的黑洞还可以再合并、再释放能量。所以从黑洞合并过程提取能量可以不必担心产生废渣。那么黑洞一分为二能不能发生呢？著名的黑洞理论家霍金(图6.5)证明，这是办不到的。他的“面积不减定理”规定，黑洞在变化中视界表面积只能增加，不能减小。而黑洞分裂将导致表面积减少，所以是禁止发生的。



图6.5 英国理论物理学家霍金(Stephen Hawking)

如果我们回忆一下热力学中的一些事实的话，我们会发现，黑洞的行为所遵循的规律，似乎有点同热力学定律相似：黑洞不断从周围“吞”进物体，物体进了黑洞便丧失了原来的所有细节性状而只保留质量、电荷和角动量三个性质。用热

力学的观点来看，物体在坍缩或掉进黑洞时，会失去大量信息，或者说熵有很大的增加。这种熵的增加用什么来度量和标志呢？恰好，黑洞面积在吞进物体时也会增加。因此，可以把黑洞的面积看作是类似于熵的东西。这样一来，"面积不减定理"正好与著名的热力学第二定律——"熵增原理"相对应。看来作这样的类比是合理的。这样的类比还可进行下去，例如黑洞的质量可类比于热力学系统的能量；黑洞的表面引力——视界处的引力强度可以类比于系统的温度。但如果我们不仅仅作类比，而是直接用黑洞视界面积来表示黑洞的熵，困难就发生了：既然视界面积标志了黑洞的熵，那么表面引力就应当标志黑洞的温度，但黑洞既然是"黑"的，就不可能有任何发射而只能吸收，也就是黑洞只能是绝对的零度，哪能有什么需要标志的温度呢？

这个矛盾在1974年终于得到了解决，霍金在研究量子力学对黑洞附近物质的行为的影响时，发现黑洞似乎总是以稳定的速度发射粒子。而且发射的粒子具有热辐射的性质，也就是说，黑洞的辐射看起来好象是一个普通的热物体在辐射一样，热物体的温度恰好同表面引力成正比。如此就证明了表面引力确实可以作为黑洞温度的标志，而黑洞并非绝对的"黑"，它有一个不等于零的温度。

这样，正如在物理学的其它领域中一样，黑洞也要受到量子力学效应的影响。经典物理认为，粒子不能摆脱原子核的强大核力跑出来；而量子力学却允许粒子"穿过"核力的势垒跑出来，发生放射性衰变现象。同样，经典物理认为，黑洞只能吸收，不能有发射；而量子力学却允许辐射从强大的黑洞引力势垒中"穿出来"。当然，也同物理学的其它领域中一样，量子效应只是在微观领域中才表现出显著的影响，对于通常的

黑洞，它的辐射委实太小而完全可以认为没有。例如对于一个太阳质量的黑洞，它的辐射所对应的温度只有6×10^{-8}K，这种温度下的热辐射是微乎其微的。当然随着辐射，将黑洞质量带走，辐射过程会加快，温度会提高，而这又反过来促进辐射，所以黑洞将会变得越来越热，辐射越来越快，最后完全“蒸发”掉。可是对于一个太阳质量的天体，这个过程要进行10^{66}年，这个数字比我们所观察到的最古老天体的年龄要大不知多少倍。所以可以认为恒星级黑洞是不受量子效应影响的。

我们在前面提到，宇宙如果经历过一个超密态时期，那就有可能生成一些质量很小的黑洞。量子效应对这种小黑洞的影响就显著了。例如一个10^{15}克的黑洞，即质子大小的一个黑洞，温度就有1200亿度，它释放能量的功率为六百万瓩，相当于六座大型核电站的功率。它的寿命大约100多亿年，当它最后消亡时，会发出能量极高的γ射线。探测这种γ射线可以证明小黑洞是否存在，进而检验各种宇宙学的理论，所以已经有人着手在搞了，这些前面已经介绍过了。

我们看到，黑洞当初进入物理学，是作为引力战胜一切排斥因素的产物出现的。它是绝对的吸引、收缩，是恒星或其它物体的坟墓，没有任何起死复生的希望。但是一旦和量子力学相结合，就发现这些结论不对了，黑洞也能发射！小型黑洞能够向周围发射高能粒子和辐射而最后自身归于消亡！这些事实启示我们：黑洞并不是物质演化的终点，被吸进黑洞的物质有可能被重新发射出来。当然这样的量子效应在大质量黑洞的情况下是微不足道的，但是我们没有理由认为量子力学不会在其它场合、以其它方式影响黑洞。例如，有人猜测，在黑洞中心的“奇点”处，物质不可能被压缩到无限大的密度，

在小于 10^{-33} 厘米的空间尺度上，广义相对论也要失效，而应代之以量子化的引力理论，物质在新规律的支配下可以避免奇点。这种新的理论还没有问世，但是从黑洞的量子力学的初步研究中，人们依稀看到了它出现在远处海平面上的桅顶。有些科学家正全力以赴为此而工作，可以预料，新的理论将统一相对论和量子论这两个现代物理的支柱，还有人甚至认为连热力学也将被包括在新的理论中。这个理论将来某一天建立起来的话，肯定是人类认识自然界的又一次重大突破！黑洞并不是物质演化的终极归宿，而对于黑洞的研究将为我们向自然界进军打开广阔的新天地。

第七章　活动的星系核

爆发和抛射的明证

河外星系——和我们的银河系一样庞大的恒星系统，是本世纪初才得到确认的。它们象沙漠中的绿洲，海洋中的岛屿，点缀着茫茫空阔无边的太空。望远镜给它们拍下了照片：有的象一个椭圆的盘子，有的还带有美丽的旋涡花样。现代

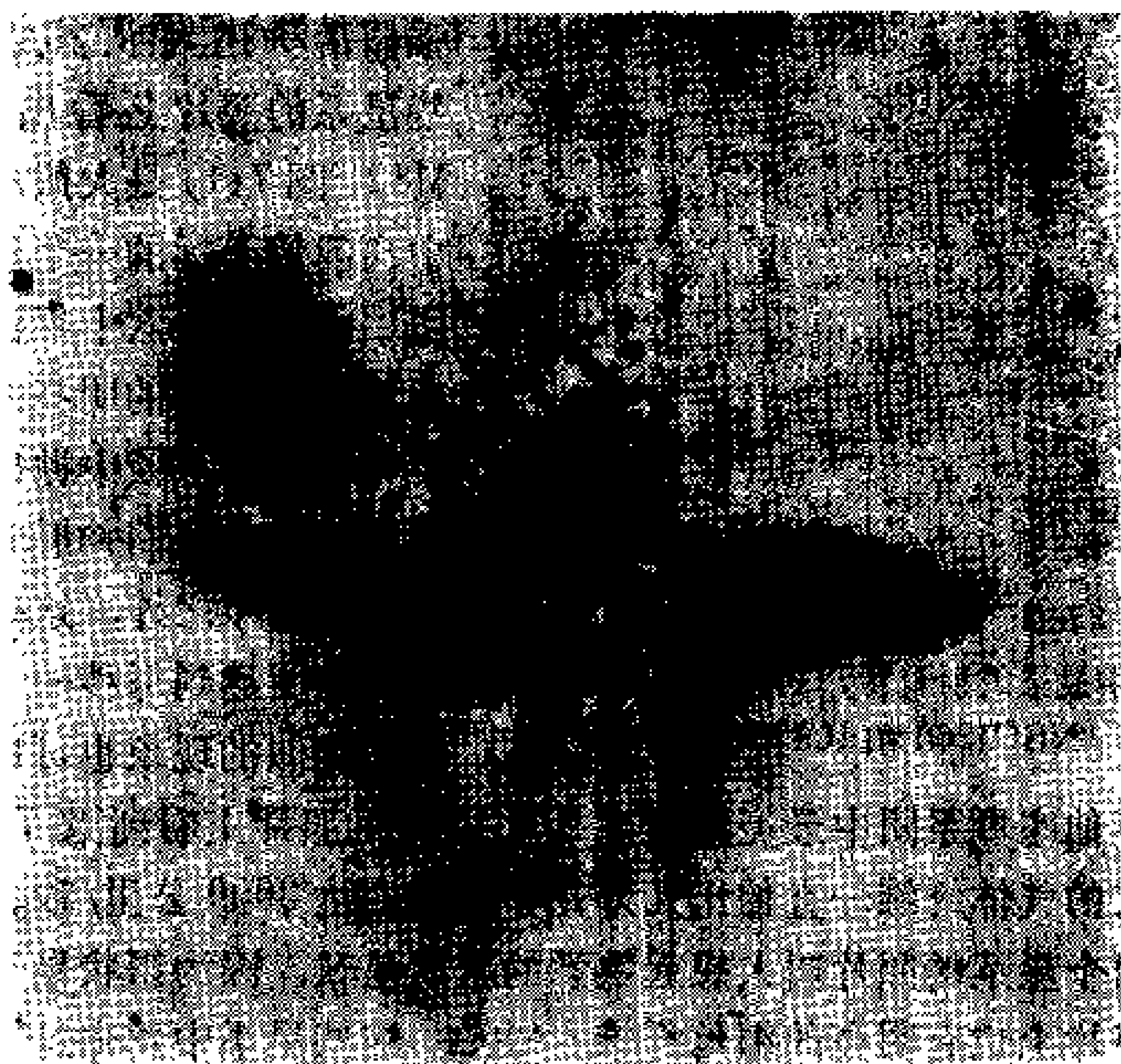


图7.1　爆发星系 M82 的红光照片，有大量物质从星系盘向上、下伸出，是核心爆发的结果

天文观测揭示出：星系内部常常发生着剧烈的活动。这种活动远不是星系内单个恒星的行为所能解释的。观测还告诉我们，星系活动中的猛烈事件，总是发生在星系的核心部分——尺度上只有整个星系的千分之一的小区域内。这是星系中最不安静、最动乱的地方。从它的光学外表就可以得到一点这方面的印象。许多星系的核心部分十分明亮，无疑表明这里是辐射最强烈的区域。这种特点以"N 型星系"最为显著，在那种曝光时间不长的照片上，它们只显示出一个小而明亮的核，使人误以为它只是一颗普通的恒星。星系核的强烈活动还可从其它一些星系的照片上看出来。M82（图 7.1）是大熊星座中离我们不远的一个星系团中的一员，六十年代的观测发现，它的明亮的纤维结构是星系核中抛出的炽热气体，它们伸展到离核一万光年之外，这些气团的速度达到每秒一千公里。类似的现象也可以在英仙座星系团中最亮的星系 NGC1275 的照片上看到(图 7.2)。它的气体纤维一直伸出几万光年，速度达 3000 公里/秒。这两个星系的照片叫人想起熟悉的蟹状星云，因为蟹状星云的照片上也有明亮的细丝纤维。也许，这些星系中发生过爆发——星系级别上的、规模大得多的爆发？七十年代，世界各国天文学家对 M82 的联合观测说明，它在大约二百万年前确实

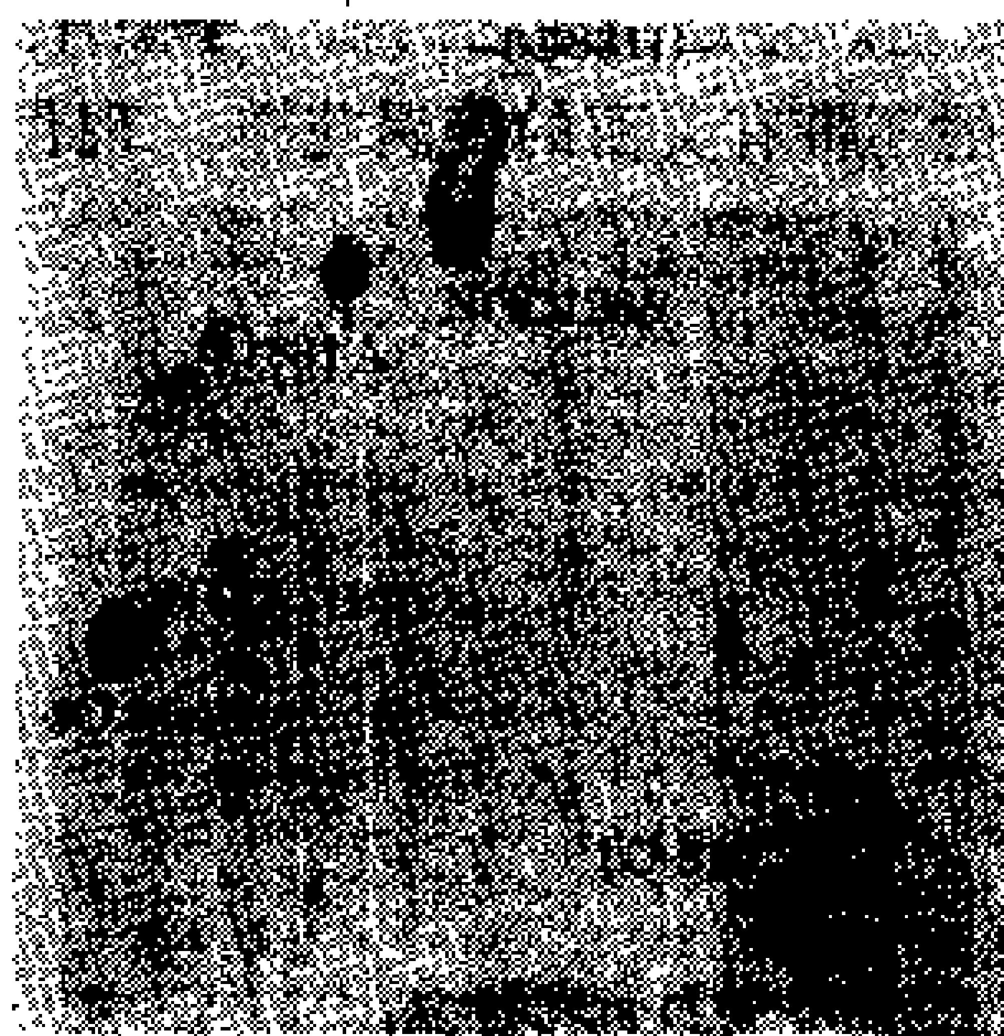


图 7.2　NGC1275 是英仙座星系团中最强的射电源，另外两个射电源 NGC1265 和 IC320 呈蝌蚪状

发生过一次大爆炸。

NGC1275属于赛弗特星系。这是美国天文学家赛弗特(Seyfert)在四十年代发现的一种星系类型，它们是旋涡星系，有极亮的核心，光谱有强发射线；而普通星系只有吸收线。最近对赛弗特星系M77作了观察，发现它除了发射可见光外，还是一个强红外源，核心发出的红外辐射量为一千亿个太阳的红外辐射量。这种辐射还表现出很大的波动，在几个月的时间内，M77的功率输出的上下差别竟达到整个银河系的光度！同时也发现核心中有巨大的气体云抛出。每一团云的直径约1000光年，等于一百万个太阳的质量，速度达600公里/秒。M77的抛射物质同另一个典型的赛弗特星系NGC 4151相比，那又简直只能算是小孩的玩意了。NGC4151(图7.3)有三个硕大的气壳从核心发出，平均每年就有一百个太阳的质量从核心抛出。这些气壳也许是在几次爆发中喷出的。

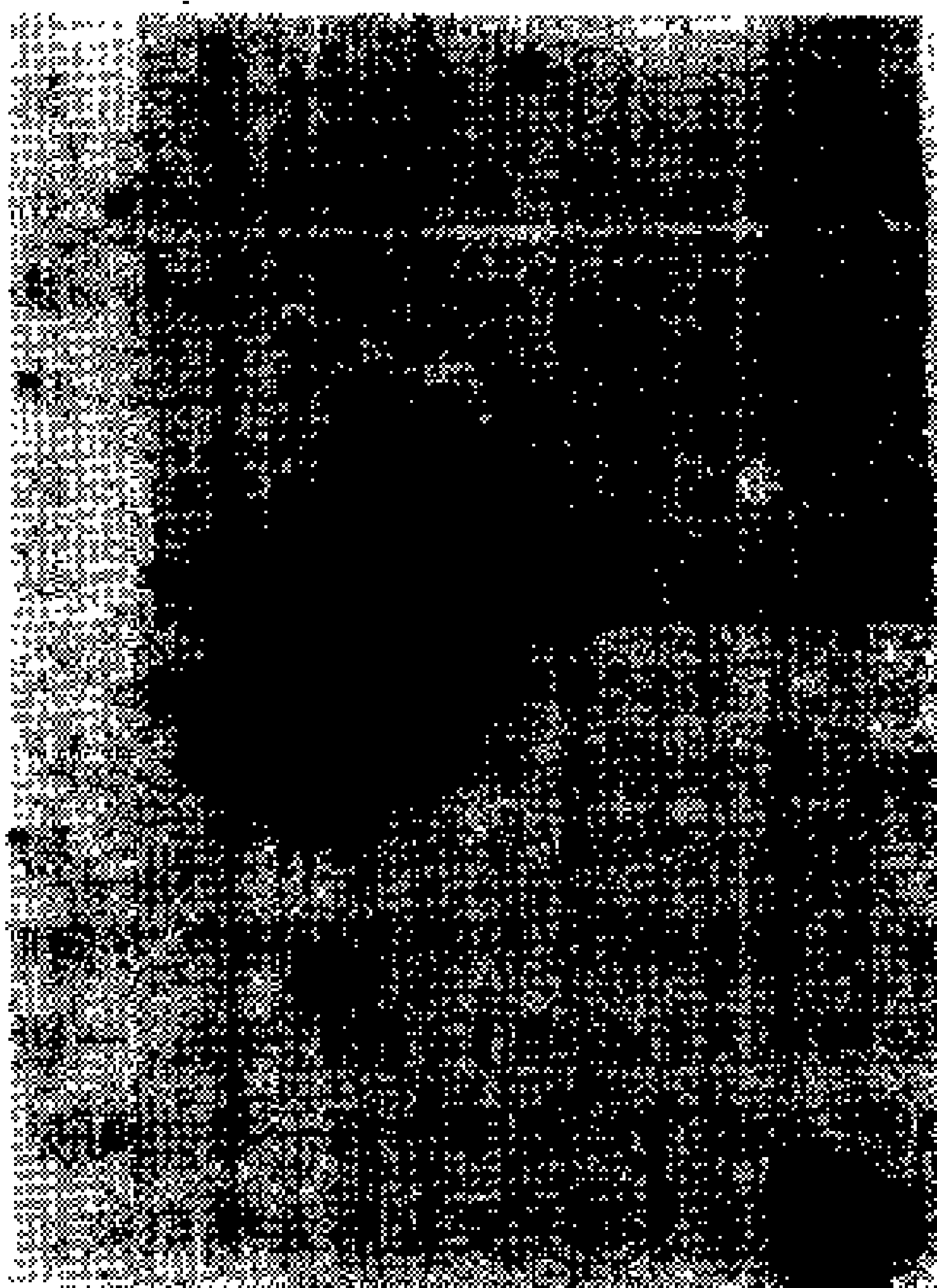


图7.3 赛弗特星系NGC4151的照相底片，有清楚的旋涡结构，但是在望远镜中却象一颗星。因为光主要是从星系的核中发出的。图中的照片是长时间曝光摄得的

关于爆发和抛射的证据，莫过于NGC1275和M87及其

它一些星系照片上的细长的伸出部分(见图7.4)，它们就象火箭喷出的气流一样。根据多普勒效应的计算，气流的速度可高达10000公里/秒！最近，有人用计算机处理M87的照片，发现这些气流呈一个个亮团排在一线上。那就说明它们是连珠炮似地由“喷嘴”发出的。如果长时间曝光，M87的照片上还可以看出在相反方向上还有一个“喷嘴”在喷射气流。

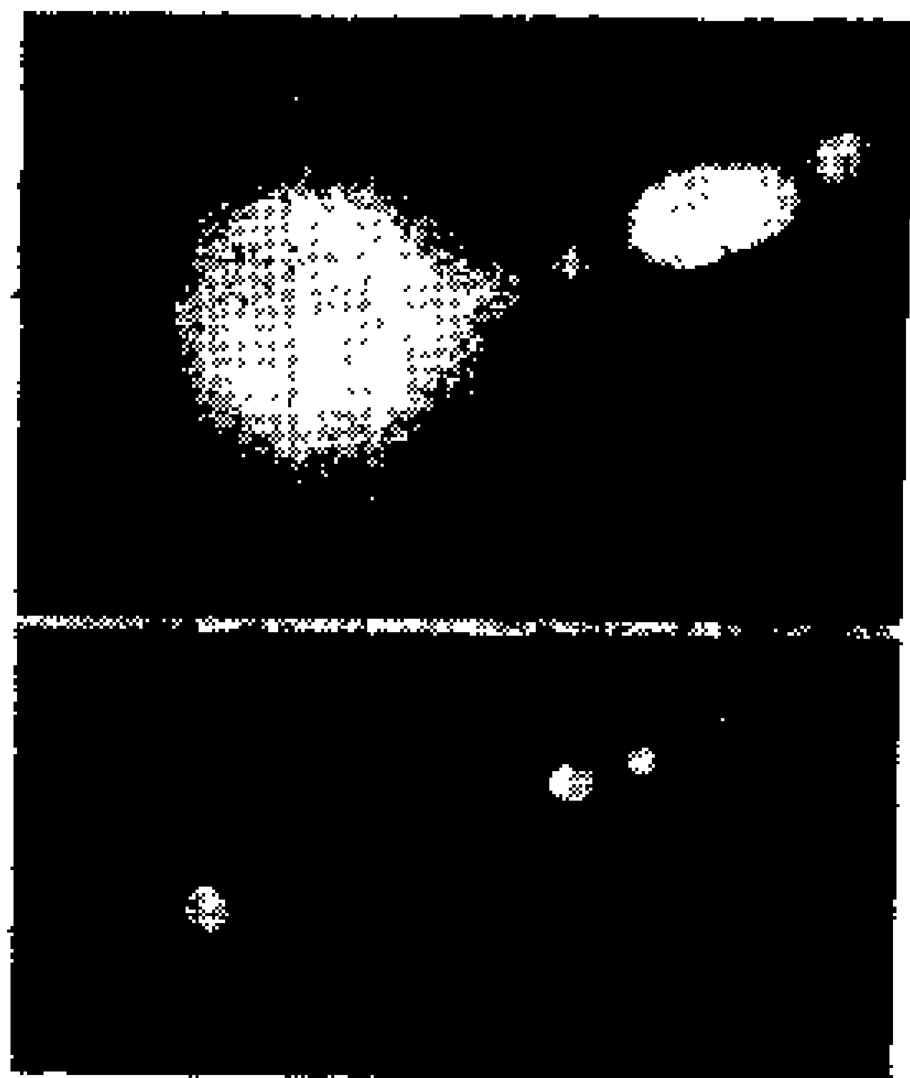


图7.4　M87中喷流的照片。上图经计算机处理提高了分辨率，使之显出下图中的六个小的子源

当我们从射电望远镜获得的射电辐射分布图上来分析星系的话，这种向两个相反方向喷射的现象，就非常明白地呈现在人们面前了。我们知道，一般的星系射电输出为10^{37}～10^{38}尔格/秒，只等于同一星系可见光输出的百万分之一。但是有些星系却主要发射无线电波。近十年来发现了越来越多的这样的射电星系。对它们的辐射分布进行分析，发现有一大类射电星系呈双源结构。天空中最强的射电源之一——天

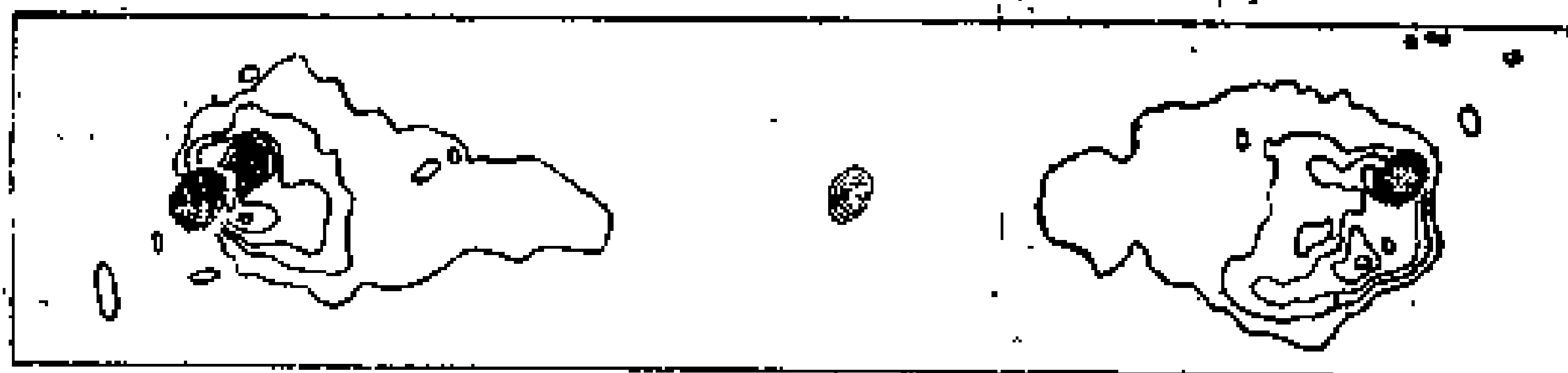


图7.5　天空中最强的射电星系之一——天鹅座A的射电轮廓图。在两个外子源的外缘有两个致密区，中心天体同一个可见的星系相对应

鹅座 A 就是这样一个射电星系(见图 7.5)。它的强大的射电波不是来自星系本身，而是来自位于星系两边的两个对称的子源，这两个发射区相隔为二弧分。详细的测绘显示出这两个子源的射电波主要来自它们外缘的致密区域，而弱射电区则几乎与中心的星系联成一个带。看起来，这两个子源象是从星系两头射出的子弹一样，今天已相隔五十万光年了。它们本身的直径也差不多等于一个星系的直径。含有的总能量达 10^{60} 尔格，几乎等于我们银河系在过去十亿年中发射能量的总和。

3C236 是和一个椭圆星系相联系的典型的射电源，六十年代初，发现它的射电辐射也来自两个致密的子源，相距为一弧秒，在这么遥远的那个距离上，一弧秒就意味着相距 6000 光年。发现后的十多年中，人们一直没有怀疑它的外边还有

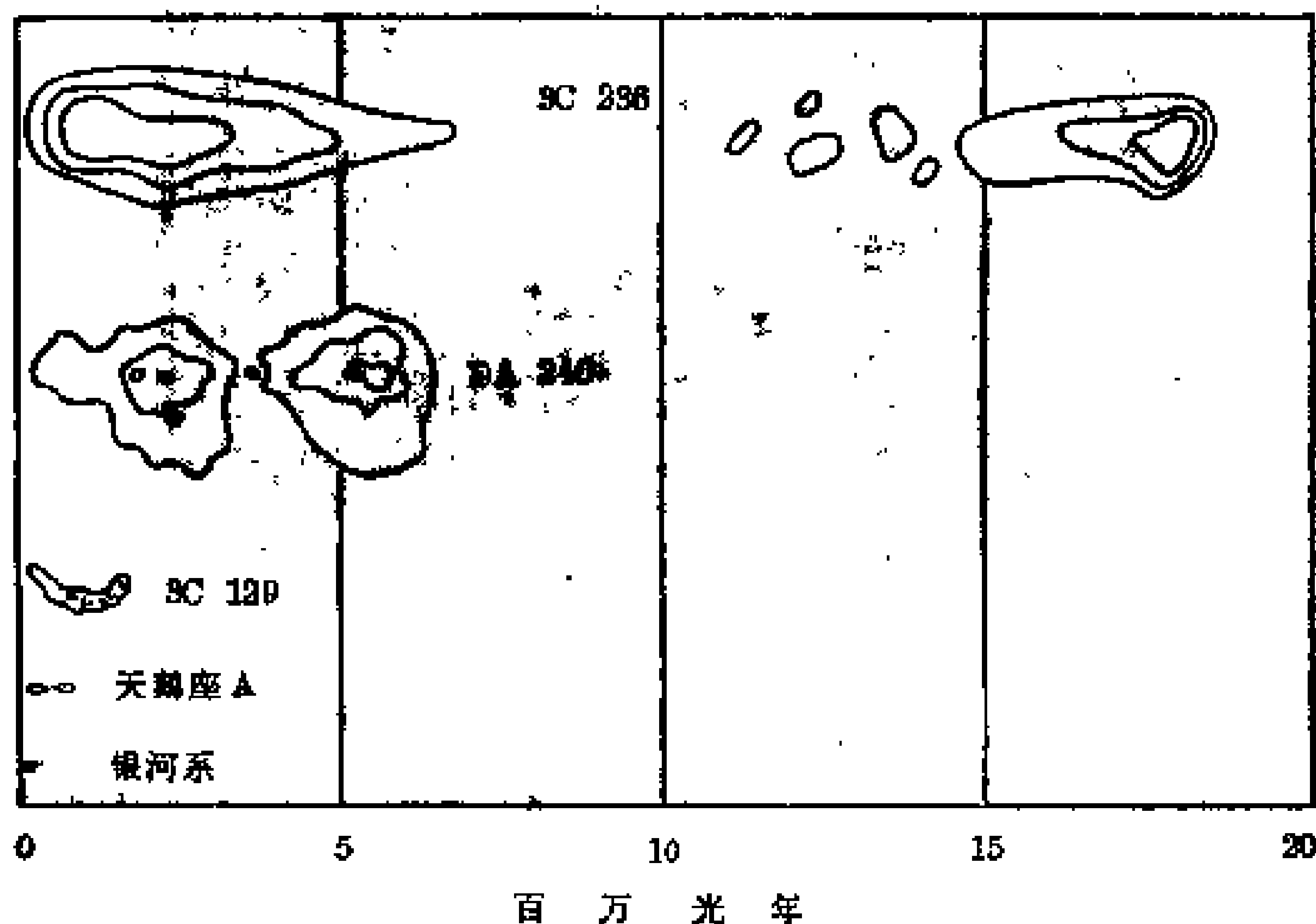


图 7.6 四个射电星系与我们银河系的大小的比较。天鹅座 A 的大小为 60 万光年。3C236 是已知的宇宙中尺寸最大的天体

一对更大的子源。这对外子源比内部的一对大3000倍。加进了外部的子源，3C236在天空中伸展39弧分的范围，相当于1800万光年，等于银河系到仙女座星云距离的八倍，比整个室女座星系团的直径还大(图7.6)。这种两对子源的结构还不止3C236一个例子。离我们较近的半人马座A(图7.7)除了有两个射电子源外，在中心星系NGC5128内，还有一对小得多的射电源。整个半人马座A在天空中伸展达10°的范围，等于二十个满月排起来那么长。

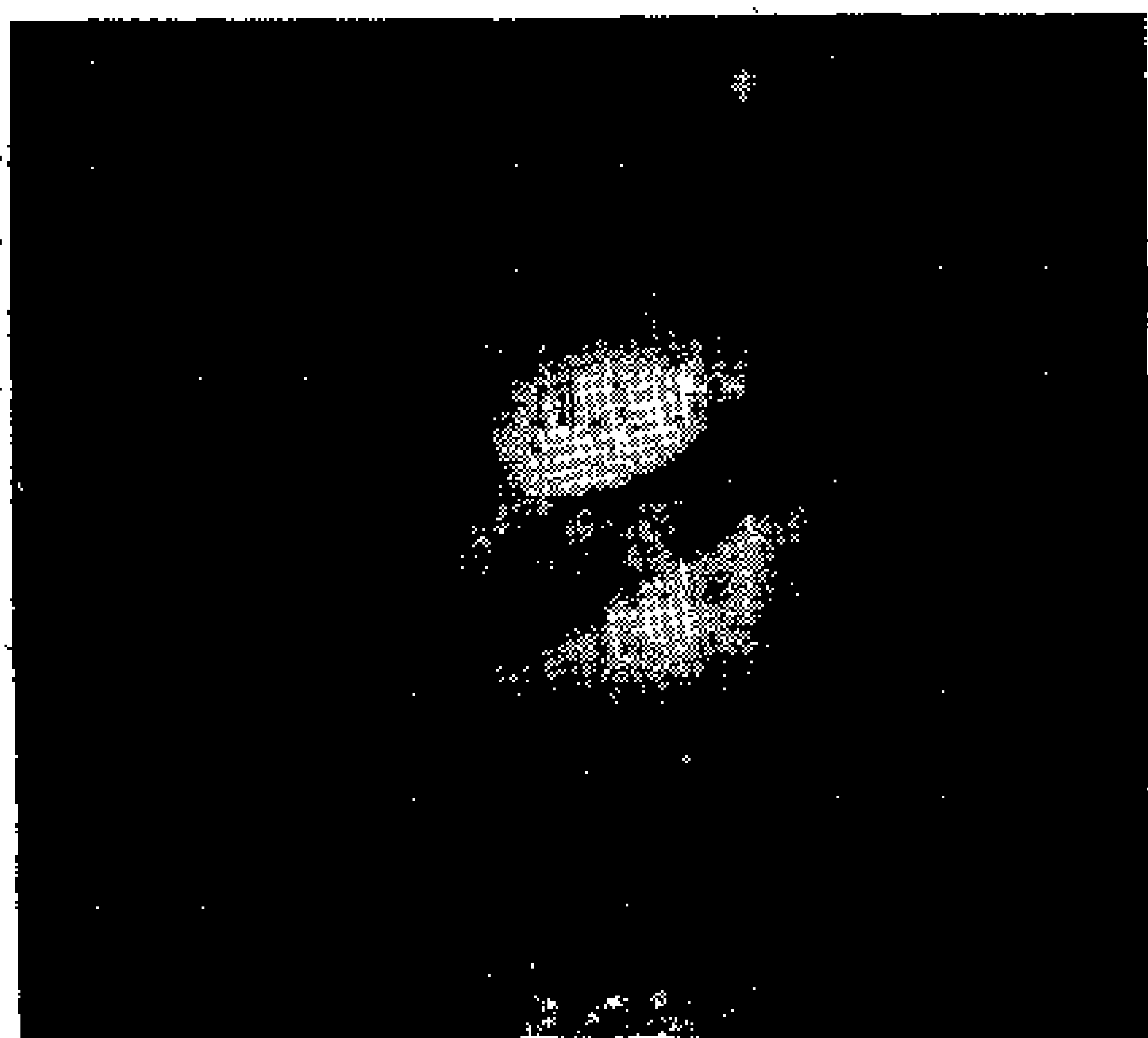


图7.7 射电星系半人马座A，也就是NGC5128，中间有尘埃云形成的暗带

这种双-双源的一个明显的特征是：所有两对子源与中心星系几乎都在同一条直线上。例如3C236的两对子源的联线的夹角只有四度。于是就提出了一个问题：这些子源如果是中心星系抛射出来的话，那么该星系对于抛射的方向一定有着极好的"记忆"，它能够在抛射出第一对子源以后的几亿年

时间里“记住”抛射方向，按原方向抛出第二对子源。对于这种记忆行为，比较公认的解释是中心星系的自转轴方向能长期保持不变，抛射就是沿这个方向发生的。从前面的照片看出，半人马座 A 的中心星系 NGC5128 有一个沿赤道分布的尘埃带，由此可以推知它的自转轴指向，这个轴同射电子源联线的方向相差确实只在 5° 以内。

除了对称结构的射电星系以外，还有一类射电星系由一头一尾构成，形状象一个蝌蚪。蝌蚪的头是一个可见星系，同时发射强射电波。头后拖着长达二、三百万光年的尾巴。它们大多出现在稠密的星系团中。起初有人以为这些尾巴是由星系团中其它星系的猛烈爆发“吹”出来的，后来认识到是由

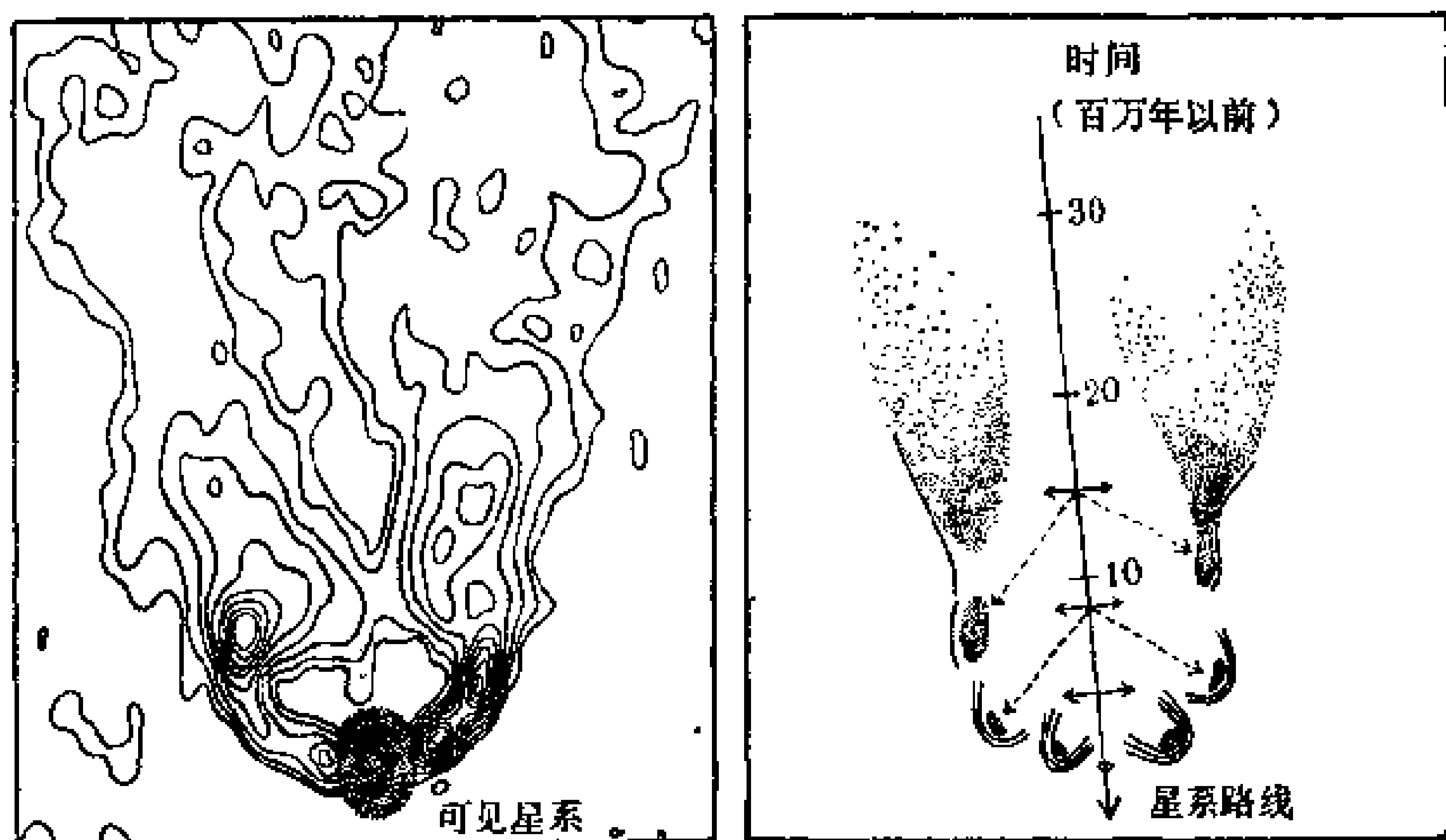


图 7.8　蝌蚪状射电星系 NGC1265 的轮廓图。对于这种形状的一个解释是它在星系际介质中运动，同时不时抛出一对气体团。气体受介质的阻碍而拖在后面形成“尾巴”。星系路线上的数字表示倒退过去的年代

星系本身形成的。星系本身有一个活动的核，当它在星系团内运动时，留下了它的活动痕迹，这就是尾。例如蝌蚪状射电源 NGC1265 的视向速度比星系团中各星系的平均速度大 2300 公里/秒，假定它的横向速度也差不多大，那么它走完其尾迹这段路程差不多要花一亿年，同它的年龄基本一致。高分辨的观察发现，NGC1265 的头内也有两个分开的发射团。这说明该星系至今还在抛射出物质。抛射的方式也许同对称双源相同，只是因为星系本身在快速移动，向两边抛出的子源便拉在后头，加上星系团中介质的阻碍作用，子源便减速而停住（见图 7.8）。这样，星系每隔几百万年爆发一次便在身后留下了一条尾巴，就好比喷烟的火车头在后面留下一缕黑烟一样。因此，看来猛烈活动的星系核都会向两边抛出物质。这些形形色色的爆发和抛射现象，提出了一系列问题，例如为什么子源总是向两边抛出？子源为什么不会散开？等等。而最大的谜是：它们的巨大能量是哪里来的？这些问题，今天还没有肯定的回答。

银河中心也不平静

浏览了广漠宇宙中那么多狂暴的星系核心，我们再来回顾自己的家园——银河系的核心吧！这是离我们最近的一个星系核。太阳系离银心只有三万多光年，而到我们最邻近的一个旋涡星系——仙女座大星云的核心，比这距离要大六十多倍。想要揭开活动星系核的秘密，先考察一下银河的中心，当然是不会无益的。叫人失望的是，在普通的天文照相里，银河的中心区同其它区域几乎没有什么不同，看上去异常的风平浪静。但很快就弄清楚，原来是银核附近有着大量的尘埃。它象一层面纱，挡住了我们的视线，使我们无法看清那里的情

形。六十年代以来，红外天文学、射电天文学和X射线天文学的发展使我们得以透过这层面纱，揭示出银河中心的真实面目。红外线和射电波波长较大，可以不受尘埃细粒的阻挡，而X射线则能量较高，可以穿透尘埃的屏障，这些来自银河中心的使者，给我们提供了一幅银河核区的图画。

银河的核也象其它星系核一样，并不是安静的太平世界。在核心的100秒差距(1秒差距=3.26光年)的距离内，恒星密度极高，每立方秒差距体积中约有一百万颗星星，比太阳附近的恒星密度大一百万倍。要是那里某个恒星有行星系，而行星系上也有人类的话，他们将看到夜空中有一百万颗星同我们的天狼星一样亮，这样的夜晚将是何等壮丽辉煌！它相当于200个满月当空照着！当然，在那样的环境中，能否有生物存在是大可怀疑的，因为恒星密度这么高，势必经常发生恒星间的接近，几致每隔几亿年就会把恒星周围的行星系破坏掉，给那里的任何生命带来末日的灾难。这样的恒星间的遭遇应当是核区剧烈活动的内容之一。

但是银河核心也不是恒星独占的世界，那里布满了大量的尘埃。银河中心的强大红外辐射就是这些尘埃发出的。此外，还有强大的射电辐射和X射线辐射。而恒星的射电和X射线发射是很弱的，这就说明银河中心并不是简单的恒星的密集。我们现在知道，银河中心位置上有着银河系内最大的射电源人马座A(图7.9)。三十年代世界上最早的射电望远镜接收到的宇宙无线电波就是从这个方向上来的。后来发现，该方向也就是银河系的动力学中心的方向。因而可以肯定强大的射电波是从银河系中心发出来的。

人马座A射电源的直径约12秒差距，射电功率为10^{37}尔格/秒。大约是太阳光度的一万倍。根据辐射谱的形状和

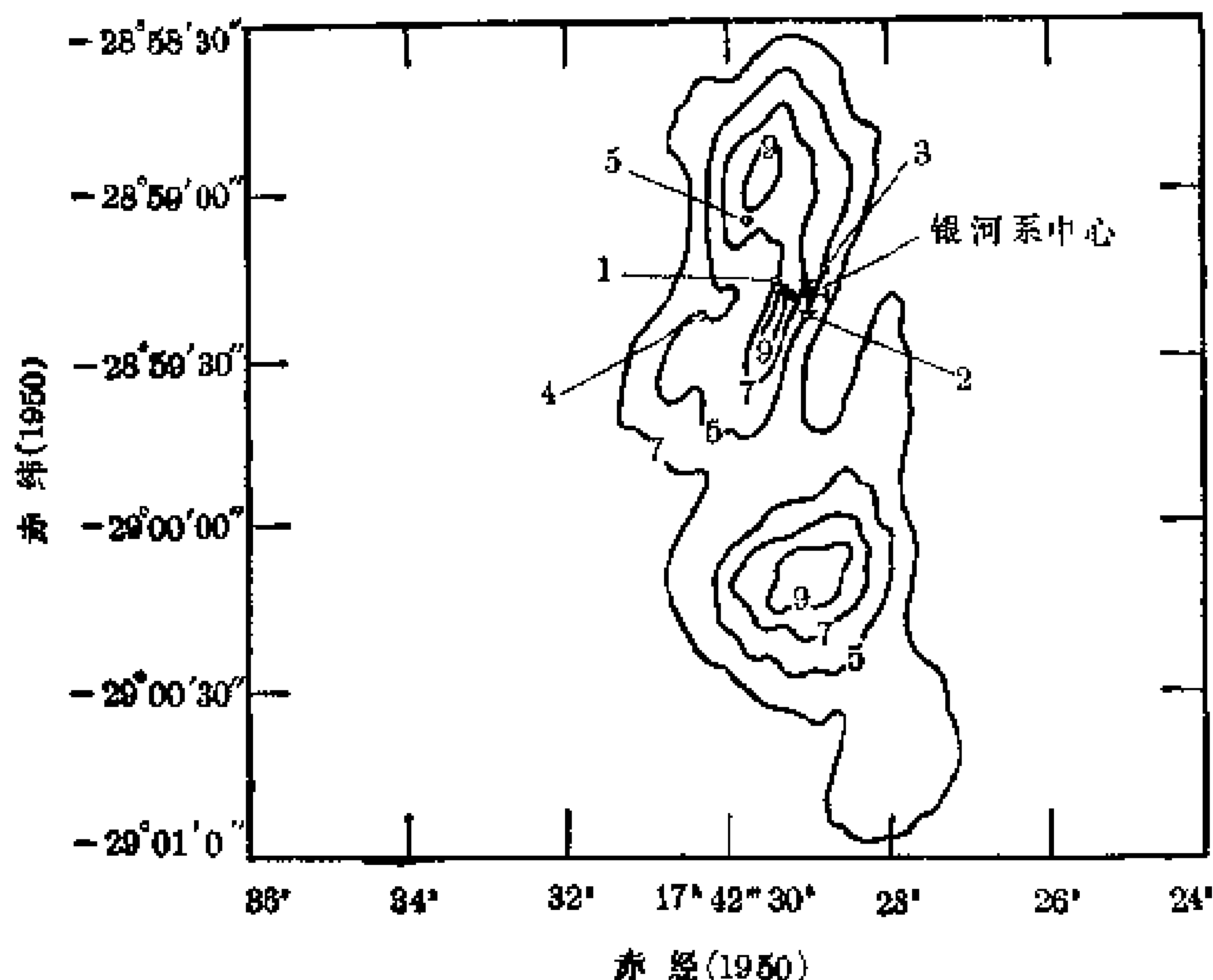


图7.9　用射电干涉仪描出的人马座A的射电轮廓图"+"记号标出了红外观测所确定的恒星密度最大的位置，也就是银河系的中心。五个标出号码的区是强红外发射源

偏振性，可以断定它是同步加速辐射，那么造成这种辐射的高能电子哪里来呢？此问题使人们猜测：银河中心发生着猛烈的活动。在关于黑洞的讨论中，我们还提到银河中心有强红外源，这是一个比射电源更小的区域，它的红外辐射比射电更强，它不可能是由尘埃产生的。看来还是由高能电子产生的。

银河中心附近发射射电波的，还有在半径大约三百秒差距处的一个环，它是由冷的气体云构成的，有着各种各样的分子，如水、氨、一氧化碳和甲醛等。这些分子能够不被破坏，说明有大量尘埃在保护它们不致受紫外线的照射。这个气环

正以每秒100公里的速度从中心向外扩张，很可能，这是中心爆发引起的。

在环的外面，离中心大约三千秒差距的地方，还有两条氢气云构成的长臂（见图7.10）。根据氢的21厘米处的发射线的多普勒移动，可以测得两条臂分别以53公里/秒的速度向我们移动和以135公里/秒的速度离开我们。那么相对于银河中心来说，它们是在趋近呢，还是在远离？这就需要确定它们位于我们同银心之间呢，还是位于银心的另外一边？后来发现，银河中心人马座A发出的连续射电发射在21厘米处受到了以53公里/秒速度运动着的臂的吸收，而没有受到以135公里/秒速度运动的臂的吸收。这就意味着，前者位于银心的我们这一侧，后者位于另一侧，而前者朝我们运动，后者离我们而去。这就说明它们都在离开银河的中心，它们原来是两条从银河中心膨胀出来的气臂，并再一次说明了银河系中心有物质抛出来。当然，比起那些活动星系核的猛烈爆发

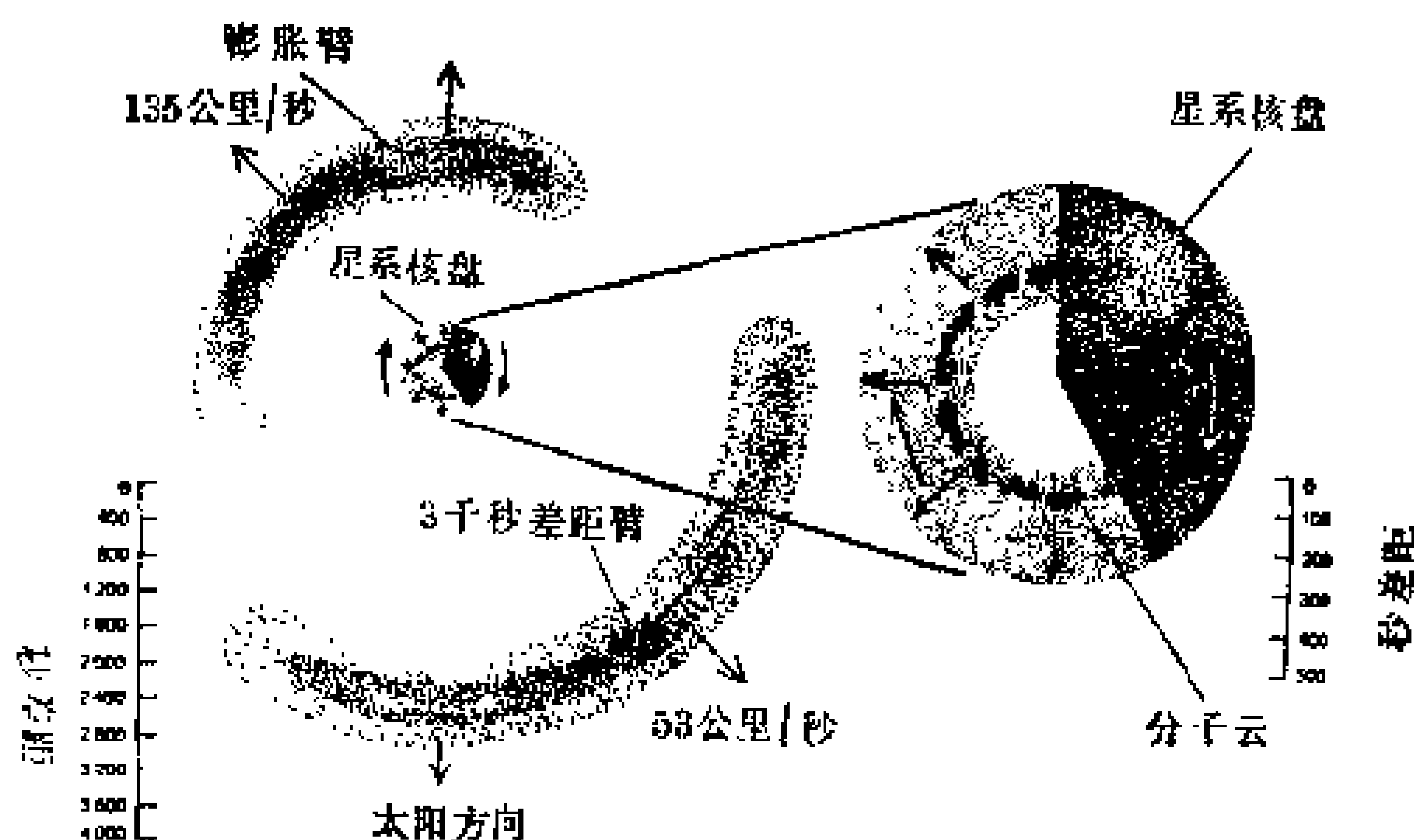


图7.10　银河中心周围的膨胀气臂，在离中心三千秒差距左右有一气臂。在三百秒差距处也有一个膨胀的分子云气环

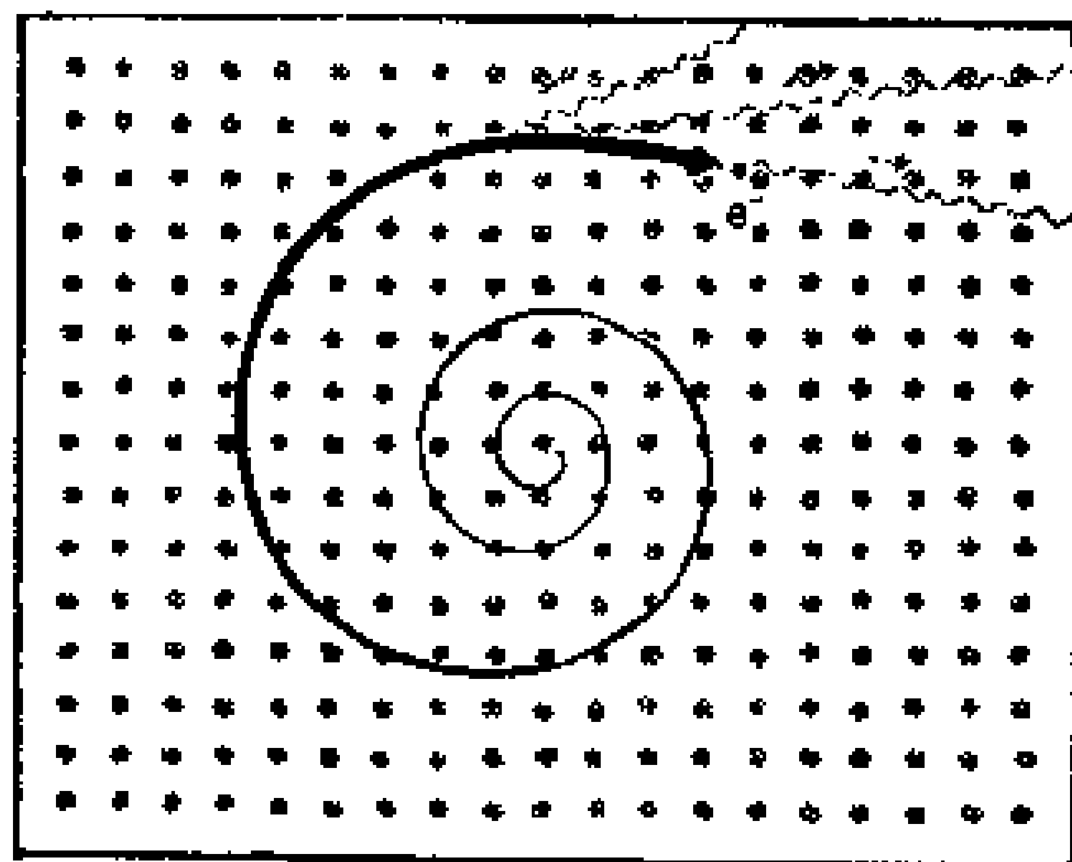
和抛射，银河中心的活动只能算是微风吹皱的涟漪而已。但它的绝对数量，仍然是十分可观的。三千秒差距地方的气臂的动能有 10^{53} 尔格，假定这是从一次爆炸中抛出来的，用简化的模型进行计算机模拟，可以发现爆炸发生在一千万年以前。当初爆炸的能量应为 3×10^{58} 尔格，相当于一万个太阳的质量完全转化为能量，抛出的质量应在一亿个太阳质量以上。

考虑到银河系中心还有半径三百秒差距的气体云环在向外扩张，说明银河系中心每隔一段时间就会爆发一次而抛出气体。根据这些气云的距离和运动，可以得出银河中心似乎每隔五百万年就爆发一次，这样在它的一百亿年的一生中，将会释放出 10^{62} 尔格能量，抛出 10^{11} 倍太阳质量，这些数目比赛弗特星系还要大，看来是不可能的。原来，气云除了膨胀以外，还有转动；当它膨胀时，转动得越来越慢。此时，引力又会把它拉回中心，随着气环的收缩，它的转动又会变快，到某一距离上，离心力会战胜引力，使气云向外扩张，因此，气云处在一种来回的脉动之中。拿三千秒差距上的气云来说，它在爆炸后一千万年第一次路过三千秒差距的距离；过了五千七百万年之后，它又会在收缩中回到这个距离上，再过六千七百万年，又重新膨胀而路过这个距离。所以我们今天看到的气臂，未必是一千万年前爆炸形成的。考虑到这一点以后，估计银河系中心每隔五亿年爆发一次，于是它一生的总能量也会减小一百倍。如此看来，我们的银河系，甚至一般的旋涡星系在一生中似乎会周期性地变得同赛弗特星系一样地活动强烈，这当然是一种推测。不过它再次提醒我们，银河系过去有过狂暴的历史，尽管它今天的活动性比赛弗特星系要弱上万倍，但它们两者还是有着许多相似和联系的。

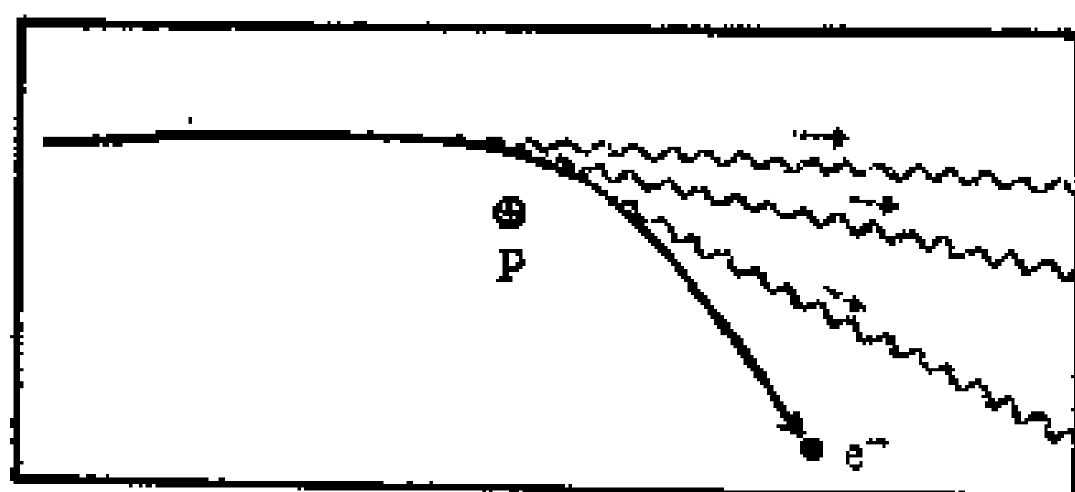
非热辐射及子源的模型

和银河系或仙女座大星云之类的正常星系相比，活动星系的尺度和能量输出的巨大就很明显了。银河系和仙女座星云的直径分别只有十万和十三万光年，它们的射电发射大多来自核区，盘内的发射是很弱的。最初，人们以为天空中射电辐射主要来自恒星和电离的氢云。但实际上，恒星的射电发射是很弱的，太阳的射电固然对地球有很大的影响，但放到恒星的距离上，就微不足道了。只有象蟹状星云那样的超新星遗迹，才有强的无线电辐射。而电离氢云的辐射固然对星系的射电有贡献，但它的强度同波长的关系与射电星系的辐射是大不相同的。这是一种轫致辐射，当电子在电离的氢云中运动而通过正离子附近时，它会受到“刹车”作用而发出光。这样的辐射很弱，完全淹没在辐射的主要部分——同步加速辐射中。所谓同步加速辐射，我们在前面已经提到过，它是速度接近光速(因此称为相对论性)的电子在磁场中沿螺旋线前进而发射出来的。同步加速辐射属于非热辐射，同恒星因高温而发出的热辐射是不同的。在天体现象中，人们还会遇到另一种非热辐射——逆康普顿散射(见图7.11)。康普顿散射是这样一种现象：当X射线照射在物质上时，会把能量传递给电子，而本身频率降低。逆康普顿效应是这个过程的反过程：高能电子把能量传递给光子，使光子能量大大提高，一个射电频率的光子会变成X射线光子，甚至变成γ射线光子。有的物理学家就用这种过程来解释射电星系中出现的X射线。我们在谈论射电星系的能量输出时，总是用巨大之类的形容词来加以描写。但就我们从这些射电源接收的能量而言，必须重申我们在第二章中说过的话：它们是极微弱的。象

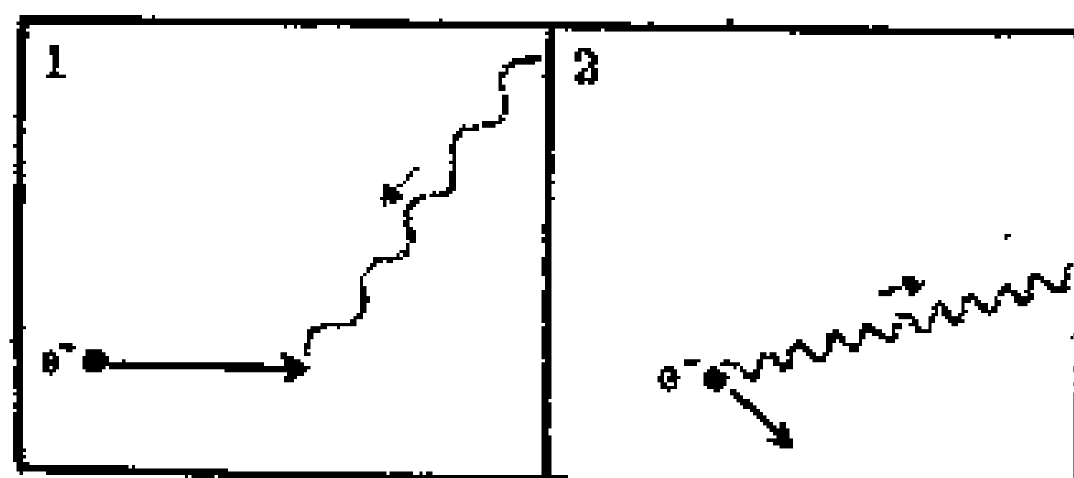
天鹅座A这样的强射电星系，用最大的望远镜收集它的射电能，即使从人类文明开始到现在这段时间得到的能量总和，也只能供一个半瓦的灯泡亮十分之几秒钟。这是因为射电星系都十分遥远，它向四面八方发出的辐射只有微乎其微的一部分落进我们的探测仪器中。



(a)



(b)



(c)

图 7.11　同步加速辐射是磁场中作螺旋运动的电子发射的(*a*)；轫致辐射是电子在核旁经过受到"刹车"而发射的(*b*)；逆康普顿散射是电子把一部分能量传递给光子使之能量升高(*c*)

为了认识活动星系的能量过程，我们还必须对发射电磁波的能量大小作一些数量上的考察。我们已经知道同步加速辐射是这些源的主要辐射形式，而其辐射能量的来源有两个：一个是高速电子，一个是磁场。磁场所贮藏的能量是与磁场强度平方成正比的。可是我们无法测到这种磁场的强度，只能从观测

到的辐射来推测。假定辐射源处于一种热平衡状态，那么它的电子能量与磁场能量之和应达到极小值，根据物理学的普遍规律，这时两部分能量应大致相等。因此磁场能量和电子能量的范围应在10^{60}尔格左右，磁场强度应为10^{-5}高斯左右。应当着重指出，如此推出的结果远低于实际的值。我们至少有两条理由说明这一点，首先，辐射源不一定处于平衡，所以能量不一定取极小值，电子能量和磁场能量也就不一定各占一半；第二，我们忽略了磁场中质子的存在，质子的同步加速辐射十分微弱，但它的能量却是不能忽略的，例如银河系中宇宙线质子流的能量比电子流几乎大三十倍。至于星系核中那种产生磁场和电子的能量过程，那就至少还要扩大十倍到一百倍。以10^{61}尔格作为辐射源的总能量，折合成氢的核能的话，相当于十亿个太阳质量的氢。

作了这些准备，我们可以来研究子源的本质了。从核中抛射出来的究竟是什么东西呢？有一种理论主张，这种气体是由电子、质子和电磁波组成的。按地球上的标准，这种气体是极稀薄的，比我们所能达到的高真空还要"空"得多。但气体有上百万度，粒子在如此稀薄的状态中可以自由地走很长路程，发出从无线电波到X射线的各种电磁波。但是该理论有一个困难，电子在10^{-5}高斯的磁场中，通过同步加速辐射和逆康普顿散射在一百万年之内就把能量损失掉了。可是，电子要从中心星系到达象3C236这样的外部子源那里，即使以光速前进也要走一千万年以上。而且，如星系中心磁场可能更强，电子的寿命可以短到只有一年，它怎么可能走那么遥远还在进行发射呢？为此，有人提出电子可能是沿两个磁极附近的磁力线前进的，没有什么螺旋运动，辐射损失也就大大减少了。如此还能说明子源为什么常常成对出现。不过，有的

人还不相信这样的解释，又提出了另一些模型来说明，损失掉能量的电子会重新受到加速。有一种模型说，抛射气体的能量有一部分贮存在气团的无规则运动中。这种无规则运动中的旋涡相撞时，便释放出动能来加速电子，使电子重新发出同步加速辐射。对于这样一种抛射出的气体，还有一个问题需要说明，这就是气体是会膨胀的，但大多数射电子源都呈受约束的形状而不是扩展得很开。于是便要求助于星系际稀薄介质的作用。这种介质对抛射气体施加压力，尤其在前锋部分最强，它不仅使子源不能很快扩展开来，还阻挡了它的运动，使它慢慢停下来，然后扩散开来。这样的模型有个缺点，就是虽然它说明抛射气体的前锋部分会受介质的压缩而使辐射增强，但不足以说明象天鹅座A的子源那种外缘的致密辐射区。为了说明子源中的这种亮斑的存在，有人提出由星系核给它们不断输送能量。能量以高效率的波束或粒子束来携带。为了说明此类射束的来历，又进一步假定星系核中有自转着的大质量天体或高压转动气体形成的"喷嘴"。这样的模型还可以解释星系核喷射方向的长期稳定性。

除了这种使电子重新加速的模型以外，还有的理论认为高能粒子是星系核中抛射出的大质量稠密天体产生的。这种天体也许有一百倍太阳质量，甚至可能是黑洞或巨型中子星。最近，天文学家在3C285等几个呈双源结构的射电星系的子源中发现了可见光辐射，可见光发射区似乎集中在子源的射电最强的地区周围。根据发光的计算，这个发射区内应有着提供高能电子的功率强大的天体。在3C285的一个子源中，还看到了一个21等亮度的蓝色天体，发出偏振光，核心象个类星体似的。这些迹象给星系抛出大质量天体的假设提供了新的支持，同时也提出了许多新的问题。

另外还有一种理论认为星系核抛出的是磁场和高能粒子组成的等离子体云。必须指出，所有这些理论目前还都是一些粗糙的假说，需要作进一步的详细推算，才能根据实际观察结果来作出选择。

星系核的模型

上面的讨论并没有回答如下一个最根本的问题：活动星系核的能量究竟是从哪里来的？根据上面的估计，这个能量至少等于十亿个太阳的氢所含的热核能量。显然，用常规的热核反应来解释能量的产生是不能说明星系核的种种爆发和抛射行为的，何况活动星系的辐射已表明完全不同于热辐射。这种情况下，一个很吸引人的想法就是用黑洞来说明活动星系的能量过程。这一点我们在介绍黑洞时已经提到过。事实上，对于黑洞的理论研究正是在关于活动星系和类星体等能源问题的刺激下蓬勃开展起来的。目前，虽然关于黑洞作为活动星系能源的结论性的证据还没有找到，但不少人认为这是最有希望的一个理论。它不必象其它理论那样把星系核中的过程归因于一些神秘的原因或人们所不了解的物理规律；却具有解释星系核能量的三个必要的条件。首先，黑洞释放能量有很高的效率。当吸积盘内的物质落进黑洞时，可有百分之十以上的质量转化为能量。而热核聚变的转化率只有百分之0.7。其次，星系核的大小一般在三十光年以内，只占整个星系体积的极小一部分，而黑洞作为自然界中最致密的物质，是符合这个要求的。最后，星系核对抛射物质的方向有很好的“记忆”，在一百万年到一亿年的时间上保持抛射方向不变。因此就要求星系核内的抛射物质的能源能抵抗外界的影响，长期保持方向的稳定，而自转的黑洞即满足这个要求，能

保持自转轴方向长期不变。

因此，关于星系核中的黑洞的种种猜测便应运而生。我们在黑洞一章中已谈到超巨椭圆星系 M87 的性质如果用一个普通椭圆星系模型便难以解释，而在中心加上一个黑洞，同观测结果就符合得很好了。这是当前呼声最高的一个星系级黑洞。其它还有人建议射电星系 NGC5128 中心也有黑洞，质量为一千万个太阳的质量。1978 年，在它的中心发现了一个极致密的 X 射线源，它的大小只有冥王星的轨道那么大，和太阳系差不多。这似乎又是一个黑洞的证据。甚至我们的银河系中心也可能有黑洞，这在前面也已经讨论过了。如果这一切得到证实，我们将得到成千上百个黑洞的例子，不管在理论上还是在实际上，都是很有意义的。

最初的星系核黑洞模型同恒星级黑洞的模型差不多，只是规模大得多。吸积盘也十分巨大。近年来，在这样模型的基础上，又考虑了自转、磁场等复杂因素。自转黑洞能把它周围的时空一齐拖着运动，以致引起一些特别的性质。而吸积俘获的气体所带的磁场会被压缩到很高的场强。黑洞要带着这种磁化吸积盘的内层一起转动，但外层的磁场就会跟不上，因为外层磁场要以同一角速度转动的话，线速度就会超过光速。于是外层磁场拖着内层磁场的后腿，使它同黑洞之间发生滑动。已经在理论上证明，这种拖拉和滑动会产生强大的电场。因而黑洞就象一个大电机一样使强大的电场遍及周围几千光年的空间。由于磁极上方的电场最强，会使那里的真空发生极化而产生出电子-正电子对，电子在磁场中沿磁力线而被排出，形成从两极流出的高速电子细束。于是，我们就从黑洞自转和磁性吸积盘出发，找到了高能电子的来源，似乎可以说明双源的许多现象。因而这种“电机模型”看来是很有生

命力的。

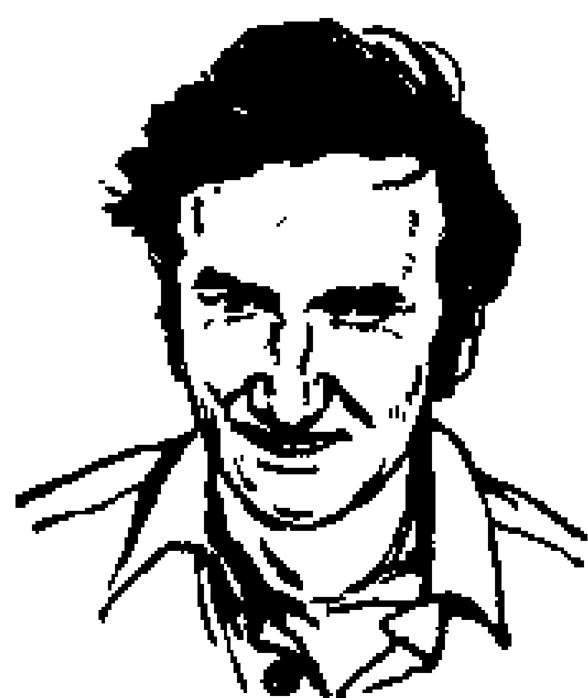
在科学家们提出种种模型来说明星系核中的巨大能量的同时，有一部分人干脆认为星系核就是物质创生的地方，甚至主张星系、恒星以至宇宙间的所有天体都是从星系核中冒出来的。世界原来是一片荒漠，空空如也，靠着几个喷泉口，才在这片荒漠上形成了一个个绿洲。但是要问这些泉的源头是什么，那又是众说纷纭了。有的认为，源头可能是宇宙中别的地方的黑洞，坍缩的物质进了黑洞，到另一个星系核中又冒了出来。有的认为，源头可能存在于我们这个宇宙之外。还有的认为，星系核或许是宇宙在超密态时期留下来的残余；这就是所谓的"白洞"说，同物质无限坍缩为黑洞的过程正好相反。自然界中是否真有其事，星系核中是否真有白洞，目前无论在理论上还是在观测中都还没有值得称道的迹象，所以多数人并不同意这种假说。

第八章　类星体之谜

令人困惑的发现

就在二十年前，天文学家对于某些貌不惊人的天体的观测，带来了天文学史上一次重大的发现——它们竟然是一类完全新型的天体，人们后来把它叫做类星体。

类星体是1960年开始发现的。在那以前，射电天文学家已记录了空中几百颗射电源，并对其中的有一些源作了位置的测定。根据这些位置，光学天文学家又把它们同光学天体对应起来，发现它们有的是银河系内的电离气体云或超新星残迹——如我们前面介绍过的蟹状星云。另一些与上一章讲过的射电星系相对应。这样在发射不同波段的电磁辐射的天体之间确定对应关系，叫做证认。为了把射电源的位置定得很准确，天文学家用射电干涉仪来从事这项工作。随着射电干涉仪技术的提高，越来越多的射电源得到精确定位。以赖尔(图8.1)为首的剑桥大学莫拉德射电天文台在这方面是先驱，他们用干涉仪法编制了射电源的位置表，称为3C射电源表。为了寻找这些源对应的光学天体，美国天文学家桑迪奇(A.Sandage)等在1960年利用当时世界上最大的五米口径的光学望远镜对表上的射电源所在天区作了搜索观测。他们发现表上第48号射电源3C48的


图8.1 英国射电天文学家赖尔(Martin Ryle)

位置上是一个亮度为16等的蓝星。普通恒星的射电发射是极弱的，如果这是一颗发射射电波的星，那倒是一个发现。因此桑迪奇等人对它进行了进一步观测，记录了它的光谱。结果发现这个蓝星有强烈的紫外辐射，周围似乎有模糊的云状物，光谱中有发射线，而且谁也认不出这是什么元素的发射线。不久，有人又利用月掩星的机会，精密测定了另一个射电源3C273的位置。此办法就是当月亮经过射电源前方时，会挡掉它的无线电波，精确测定电波中断的时刻，便可确定它的位置。同光学观测相对照，发现3C273对应于一颗比3C48还亮的星。月掩星的射电观测还发现3C273由两个子源构成，两者相隔19.5弧秒，其中一个比另一个强四倍左右（见图8.2）。

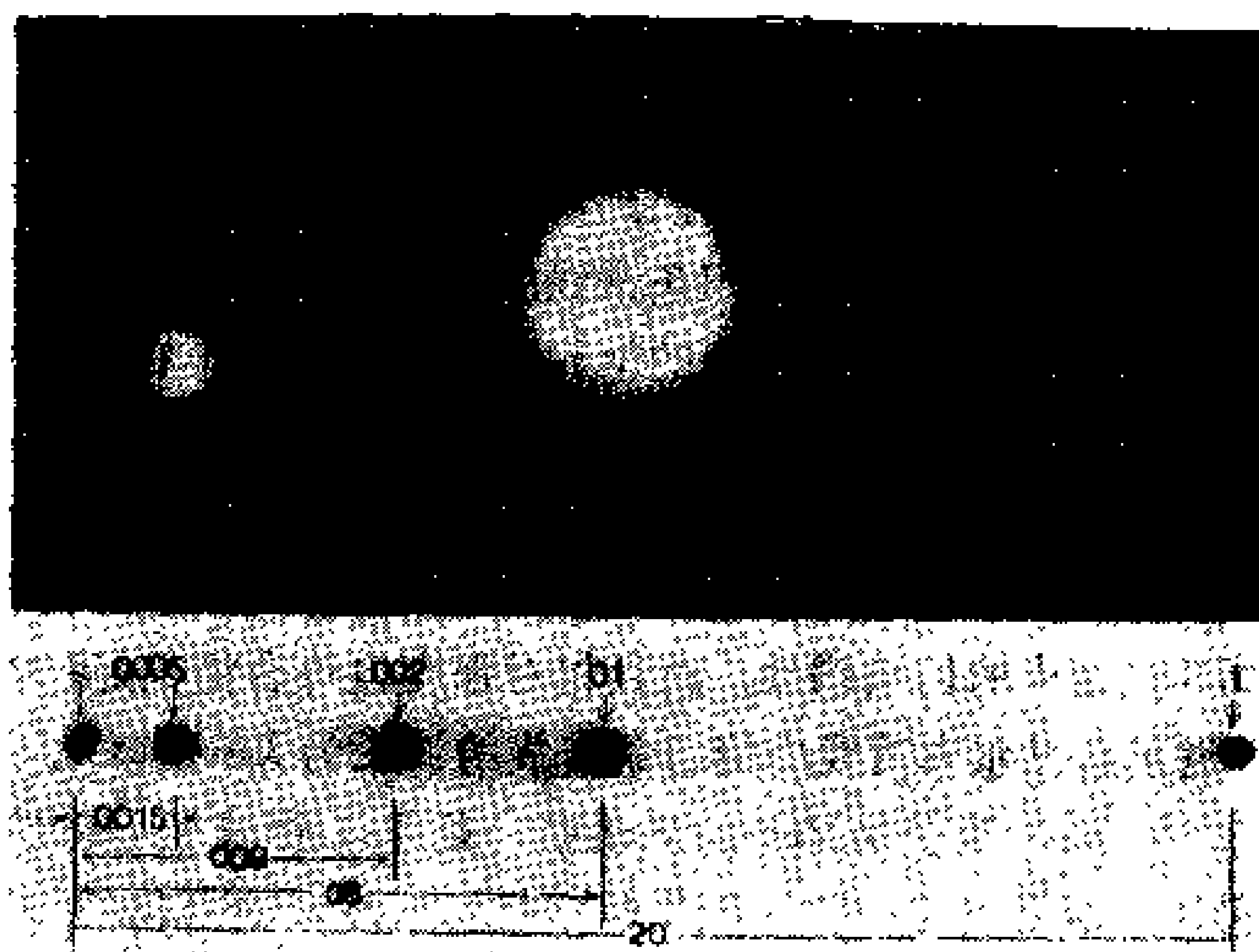


图8.2 第一个发现的类星体3C273的光学照片，可以看到有喷流向右伸出，照片底下是它的射电结构，上面一行数字是各子源的大小，下面一行是它们离中心的距离，均以弧秒为单位

如果光看这些天体的光学照相，而不知道它们的射电行为，那么它们象普通的暗弱恒星一样，貌不惊人，不能引起人们任何的注意。可是一对照它们的射电行为，问题就出来了，这些会发射无线电波的"星"究竟是什么呢？不久，人们获得了这些星状射电源的光谱资料。使天文学家感到迷惑的是，这些光谱有许多不认识的宽发射线，与人们积累起来的几十万颗恒星的光谱都不一样。似乎这些天体上的元素同其它恒星和我们地球的成分完全不一样。谱线之谜在1963年被施密特（图8.3）找到了答案。施密特对这类奇怪天体的最亮者3C273的光谱作了仔细分析，因为它在光学波段上是一个12.5等星，容易搞到清晰的光谱。他发现光谱中有四条谱线的相对位置看起来象氢元素的巴尔末谱线，不过正常的氢元素巴尔末谱线不在这个位置上，但如果大胆设想氢元素的谱线从正常位置向红端移了一段很大的距离，那么问题就可以迎刃而解了。也就是说，只要把每条氢元素的巴尔末谱线乘上1.158倍，便可以得到3C273光谱中的四条谱线，而且相对强度也符合得很好。例如，氢元素巴尔末谱线中第二条谱线的波长为$\lambda=4861\text{Å}$，乘以1.158刚好等于3C273的光谱中一条谱线的波长5632Å。其它几条谱线也是一样。天文学家把谱线波长的变化值与原来谱线波长的比叫做红移量，用z来表示：



图8.3　最先解释类星体光谱的美国天文学家施密特(Maarten Schmidt)

$$z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}。$$

因此，3C273的红移量就是0.158。

使人兴奋的是，只要假定一个红移量，这些奇怪的“射电星”的谱线就都能辨认出来了。例如3C48的红移是0.367。看来，这些“射电星”虽然奇特，但毕竟还是由同其它天体一样的元素组成的。只不过要加进一个红移。此红移对天文学家来说，倒不是什么陌生的东西。不过这些新型天体的红移量之大，却是前所未有的。一般恒星的谱线红移只有千分之几，在光谱上看起来只是使谱线稍有移动，不致于移动得面目全非。而新发现的天体的红移量比恒星红移要大百倍以上，最小的也有十分之一以上。看来，它们虽然视尺度象星一样小，但毕竟不是恒星。人们把这一类似星非星的天体叫做类星体。

从1960年到今天，近二十年过去了。天文学家估计天空中的类星体有成千上万个。从这些类星体中，可以概括它们的共同特征：具有很大的红移量，目前已测得红移的六百多个类星体中红移量最大者达到3.53，紫外线经过红移变成了绿光，最小者也有0.15。它们的光学象是恒星状的点。往往有比通常恒星丰富的紫外辐射，因而显得发蓝。类星体虽然是在射电源中发现的，但后来发现一部分类星体并不发射无线电波，而有几个类星体3C273等还能发射X射线。从光谱看，类星体都有明亮的发射谱线，有些类星体还有吸收谱线。

红移的争论

类星体光谱中的陌生谱线被认出来了，似乎谜已经解开了，但实际上只是把矛盾的焦点移到了另一个方面：类星体这么巨大的红移哪里来的呢？

红移的最熟知的来源是多普勒效应，这是天文学家经常

要打交道的一种现象。多普勒效应在日常生活中的一个例子是：当我们坐在火车里，如果对面有飞驰开来的火车，它的汽笛声就会突然变得很尖锐刺耳；但火车开过身旁而远去时，汽笛的声调便一下子低沉下来。这是由于朝我们运动的声源发出的声音频率会变高，而离我们而去的声源发出的声音频率会降低。这种频率的变化同声源的速度有关。两列对开的火车相对速度较大，所以多普勒效应比较显著。在光以及整个电磁波段上，也有多普勒效应。如果光源朝观察者运动，光的频率会显得比静止时高，如果是谱线，就会向高频端——蓝端移动。如果光源退离观察者而去，就会发生红移。由于天体总是相对于地球有运动的，所以谱线的移动在天文学中司空见惯，它给人们提供了许多关于天体运动状态的信息，我们在其它各章里都可以看到这方面的例子。

二十世纪以来的天文观测发现，在数以亿计的河外星系中，除三个很邻近的星系以外，其余的所有星系的谱线都表现出红移。用多普勒效应进行解释，表明这些星系都在退离我们而远去。该事实被越来越多的证据所进一步证实，已为科学界所公认。1929 年，哈勃(图 8.4)还发现了星系退离速度同它的距离成正比的关系，称为哈勃定律(图 8.5)。因此，红移越大，表明星系的退行速度越大，而根据哈勃定律，这也表明星系的距离越遥远。因此河外星系的红移成了它的距离的标志，我们把这种与距离有关的红移称为“宇宙学红移”。

为什么会造成河外星系的普遍退行呢？为了说明此现象，请设想一个画着许多小点的气球，当气球膨胀时，气球表面各点便相互散开，站在气球上任何一点来看，其余各点都在远离他而去，而且他将发现离得越远，退行速度也越大(见图 8.6)。这种现象在哪一点来看都是一样。如果把星系看作气球上的



图 8.4　美国天文学家哈勃(Edwin P. Hubble, 1889～1953)正在观测

点，那么可以知道，我们所在的这个宇宙区域，直到所能观测到的最遥远的地方，都处在膨胀之中。事实上，爱因斯坦创立了广义相对论之后不久，就有人根据广义相对论的理论，预言了这种膨胀现象。哈勃的观测为这种预言提供了第一个证据。

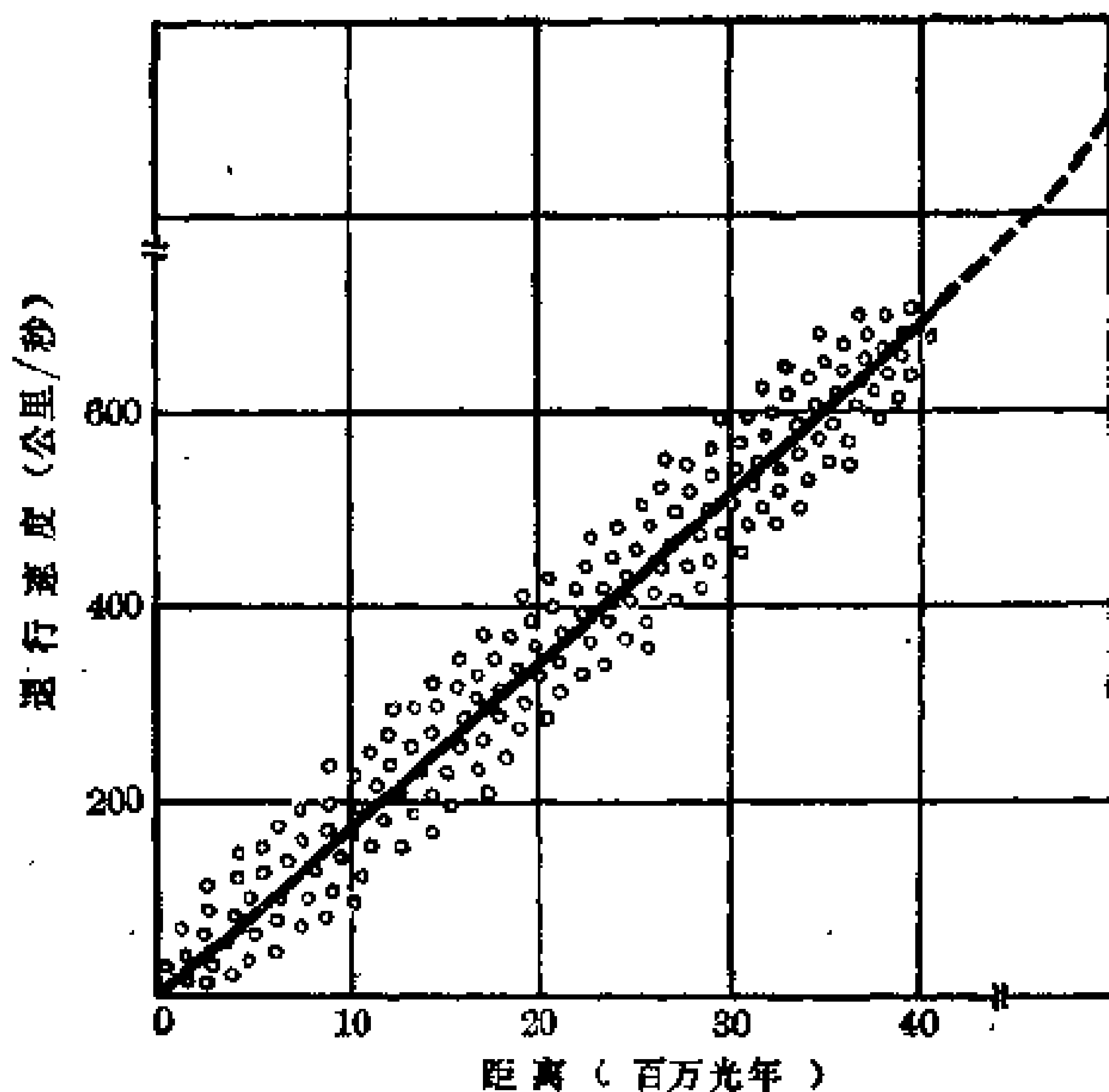


图 8.5 哈勃定律是通过对许多星系的速度与距离之比进行测量而建立起来的。图上每个点代表一个星系的这种比值，直线是大量数据得出的最佳估计。现在所得的比值是 50 公里/秒·百万秒差距。虚线表示在远距离处星系的退行速度

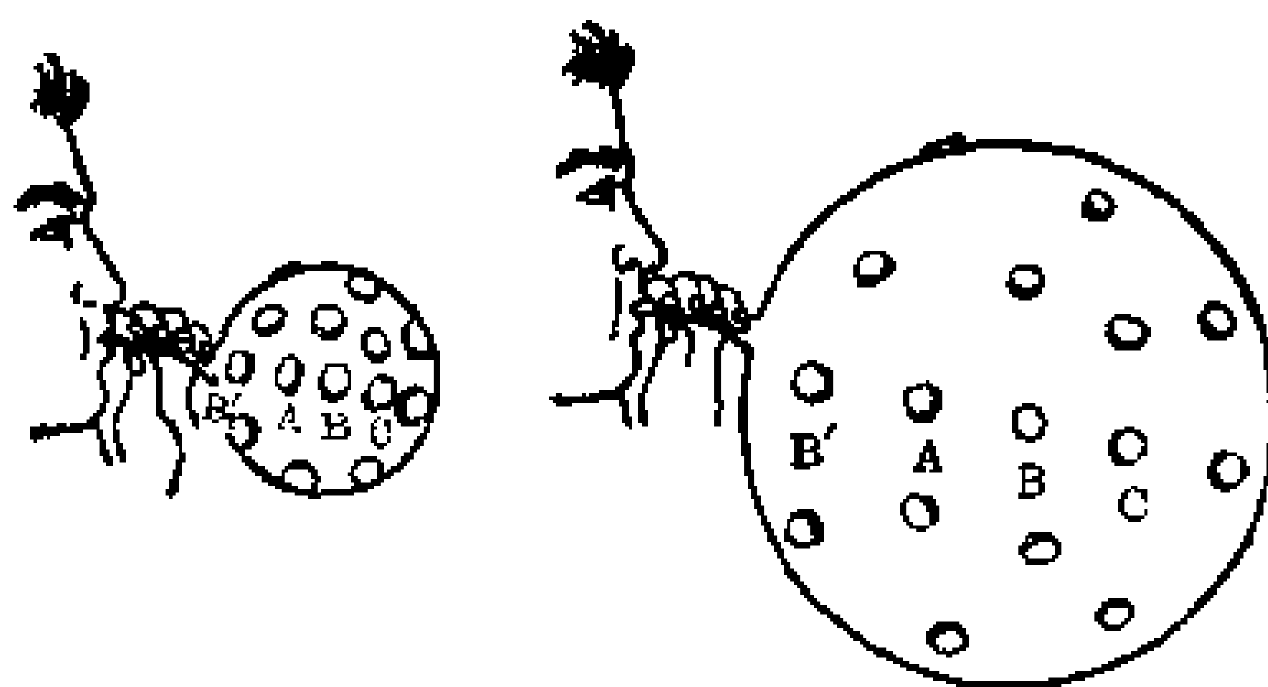


图 8.6 宇宙的膨胀可用气球的膨胀作类比。气球上每一个斑点都可以认为自己是膨胀的中心

再回到类星体的红移上来。如果类星体的红移也是多普勒效应造成的，那么类星体的巨大的红移量就意味着它们是已知的天体中最遥远的天体。例如 3C273 的红移是0.158，属于红移较小的类星体。据此可以推出它退离我们的速度是光速的六分之一。根据哈勃定律指出的距离和后退速度的关系，可以估计它的距离是二十亿光年左右。还有许多红移更大的类星体，估计出来的距离就更大，达几十亿光年。我们太阳系的年龄也不过五十亿年，因此，我们今天看到的许多类星体的光，在太阳系刚形成时已经从类星体出发上路了。这些类星体不仅遥远，而且退离速度也极大，有些已经接近光速。

如果类星体果然是那么遥远，新的难题就出现了。如此遥远的天体竟然还呈现在我们的望远镜中，而且还不算太暗，例如 3C273 是 12.5 等星，不大的望远镜就能看见，那么它们的固有光度一定是异常大的。另一方面，即使在最大的望远镜中，类星体都只有一个点状的象，显不出任何内部的结构，这说明它们的尺寸是不大的。那么，不大的体积中如何才能提供巨大的能量来让它发光呢？这就是类星体之谜的根本所在。为了解决大能量和小尺寸的矛盾，有些天文学家怀疑，也许类星体并不是十分遥远的天体，它们可能就在银河系附近，甚至在银河系内。这样，它们发射的光也就不算很大了，只和普通的恒星差不多。一句话，如果认为类星体的巨大红移并不是它们巨大距离的标志，能量的矛盾就可以克服。可是，如此大的红移又是如何解释呢？

广义相对论指出了红移的另外一个来源：引力红移。广义相对论告诉我们，光离开星体表面射出时，也同普通物质一样受到引力的吸引而消耗能量，这一点在前面讨论黑洞与引力坍缩时已经谈到过。如果星体的引力场很强大，那么光在

这样的引力场中挣脱束缚而逃出来时，能量便会有显著的损耗，而光的能量是同频率有关的，因而就表现为光频的降低，也就是向红端移动。这就是引力红移。银河系中的白矮星光谱就有这种现象，不过红移量不大。用引力红移来说明类星体红移的来历固然可以避免它们十分遥远的结论，但是要产生巨大的红移就需要有强大的引力场。强引力场必然会对周围的天体运动产生明显的影响。例如3C273这样一颗星如果在银河系的某处，为了产生0.158那么大的引力红移，它的质量必须极为巨大，以致银河系的自转都会受到影响；这同实际的观测是完全矛盾的。

类星体红移的引力起源这条路堵死之后，仍有人主张这种红移不能标志类星体的距离。也就是说，类星体红移不是宇宙学红移。他们的证据是天空中有些相互联系的天体，红移却相差很大。说明离我们距离差不多的天体可以有不同的红移，这至少否定了红移和距离之间有必然的关系。例如有人收集了十来个例子作为其论点的证据。但是这些例证并不是很可靠的，因为所谓相互联系的天体是很难以确定的。我们所看到的天空景象，是各种天体投影在天空上的平面图，两个天体比较靠近也许只是视觉上的效应，实际上前后相差很大的距离。何况还有相反的例证，有的类星体与星系相近，它们的红移也一样。事实上，近来有人对17个类星体作了分析，在它们的附近寻找其它星系与它们相联系的证据。结果，他们在每个类星体为中心、45弧秒为半径的区域内共找到了29个星系；并对其中的25个测得了红移，发现有13个与类星体红移相近。这样的结果如果完全是偶然造成的话，那么只有百万分之一的几率。而且事先是没有带着偏向去挑选这17个类星体的，所以比那种相反的例证更令人信服。

当然，类星体红移的本质的争论并没有结束，坚持类星体是近处天体的天文学家手中还有一定的证据。例如，近年发现有的同一类星体光谱的吸收线有不同的红移，这似乎是很有力的证据，表明红移和距离并无必然的关系。但是，如果认为这些吸收线是类星体的光线在到达地球之前的半路上遇到吸收物质造成的，那么由于吸收物质的速度各不相同，造成吸收线红移也会各不相同。所以，两种意见的胜负仍然不见分晓。又有人认为红移虽是多普勒效应所造成，但哈勃定律对它们不适用。类星体只是速度很高，但距离不远。例如可能是银河系中心高速抛出的物质，或是附近星系抛出的天体等等。关于这样的意见，也可以提出不少理由加以驳斥：我们银河系的恒星速度很少超过每秒100公里，所以它们在天空中似乎是“恒定不动”的，而对于类星体这么高的速度，是很容易发现其位置变动的，天文学家早就会注意到它们，而不会到六十年代才发现。而且，现在估计，类星体的数目在几千万颗以上，我们的银河系是完全供不起它们的能量消耗的。就算有这样的可能，那么因为抛射会在各个方向上进行，我们就不仅能看到红移，也能看到紫移。而实际上类星体却只有红移。如此说来，几乎可以否定类星体属于邻近天体的结论。

总而言之，红移是宇宙学的，还是别的什么本质，这是类星体之谜中举足轻重的问题。它引起了天文学界和物理学界的强烈兴趣，造成了百家争鸣的局面。除了上面介绍的几种观点以外，有些物理学家提出了“基本物理常数变化”，“光子老化”，“基本粒子演化”等等假说来对红移作解释，涉及到对更基本的物理学规律的认识问题，就不在此一一介绍了。不过全面权衡各家学说的优劣得失，似乎可以说，类星体红移确是宇宙学红移，它们是极其遥远的天体；支持该论点的证据是

比较充分的。当然，类星体这个总名称下的大量天体，看来也不都是一样的，它们在形态结构，辐射特性等方面有明显的差别。随着研究的进一步深入，在更多、更揭示本质的观察资料的基础上，类星体红移的本质一定会真相大白的。

能源机制种种

从表面上看，类星体是一些暗淡的天体。肉眼是无法看到任何一个类星体的。在望远镜的照片上，它们是一个个斑点。但是如果承认类星体的距离是它们的红移所标志的，那么它们的距离就极为遥远。而如此遥远的天体在地球上看起来竟同银河系中的一些恒星一样亮，那它们无疑是我们在宇宙中见到的最亮的天体了。事实上确是如此，根据类星体的亮度和它的红移所标志的距离，很容易计算出，类星体发出的可见光要比旋涡星系发出的光强近百倍。而类星体的可见光波长上的能量输出只是它全部能量输出的一小部分。红外天文学观测表明，在远红外区，即波长 10000Å 到 100000Å 的范围内，类星体发射的能量更大得惊人，要比已知星系的能量输出大上千倍。类星体不仅有强烈的辐射，而且还有抛射物质的迹象。前面说过，3C273 有两个子源，看起来那个强射电子源是从那个与光学天体对应的源中抛出来的。根据两者的距离，估计至少在十万年以前就抛出来了；这说明此类星体至少已经存在了十万年。在十万年时间里，它至少已经挥霍了 10^{61} 尔格的能量。这些能量的来源是什么呢？

这里我们又遇到了类星体的小尺度问题。一个普通的星系，处在 3C273 那么远的距离上，望远镜还是能分辨它的细节的，但其亮度不到类星体的百分之一。而类星体的象却只有一个神秘的点。这一点在确定了类星体的尺度上限之后，就

显得更为突出。其上限是通过分析类星体的亮度变化行为得到的。原来，美国哈佛学院天文台保持了上世纪末以来拍下的许多天空照片。在3C273发现后不久，有人就从中找出了七十年代以来曾拍下3C273的六百多张照片，希望看看这颗现在被认为是类星体的“星”的“近代历史”。结果发现它的亮度在数以年计的时间上有很大的改变，而且还有持续不到一个月的耀变。其它大多数类星体，在其发现以后的短时间内也表现出类似的亮度变化。有人发现3C345这个类星体的亮度在几周时间内变化了百分之四十，而在十月份的亮度比它在六月份的亮度要大三倍。桑迪奇发现另一个类星体3C446在几个月内亮度增大了三等，也就是15倍。后来还观察到24小时改变二倍的事例。在波长为几厘米的无线电波段，也发现3C273在二年半时间内强度改变了百分之四十；在毫米波段，也有类似的变化。总之，可以看到类星体在一年左右的时间里，亮度可以改变一个星等左右；有的甚至在更短的时间里，就产生那么大的变化。这就告诉我们，类星体的尺度是很小的(图8.7)；因为假如它尺度很大，例如说超过一光年，那么由于任何信息的传递都不能超过光速，所以如果有什么因素在“指挥”类星体的亮度变化的话，这种指挥信号传达到各部分的时间前后就会相差一年以上。各部分接到信号后发生亮度变化而造成的此起彼伏就使我们看不到时间在一年以内的变化现象。而且，就算有一种办法使整个类星体发生同时的亮度变化，但因为它的尺度大于一光年，以致各部分发出的光到我们眼里的时间也会前后相差一年，而使我们不会看到时间不到一年的变化现象。如此看来，类星体的尺度一定只有若干光年，有的甚至只有几个“光月”。也就是说它们的直径只有普通星系的十万分之一，以至百万分之一！

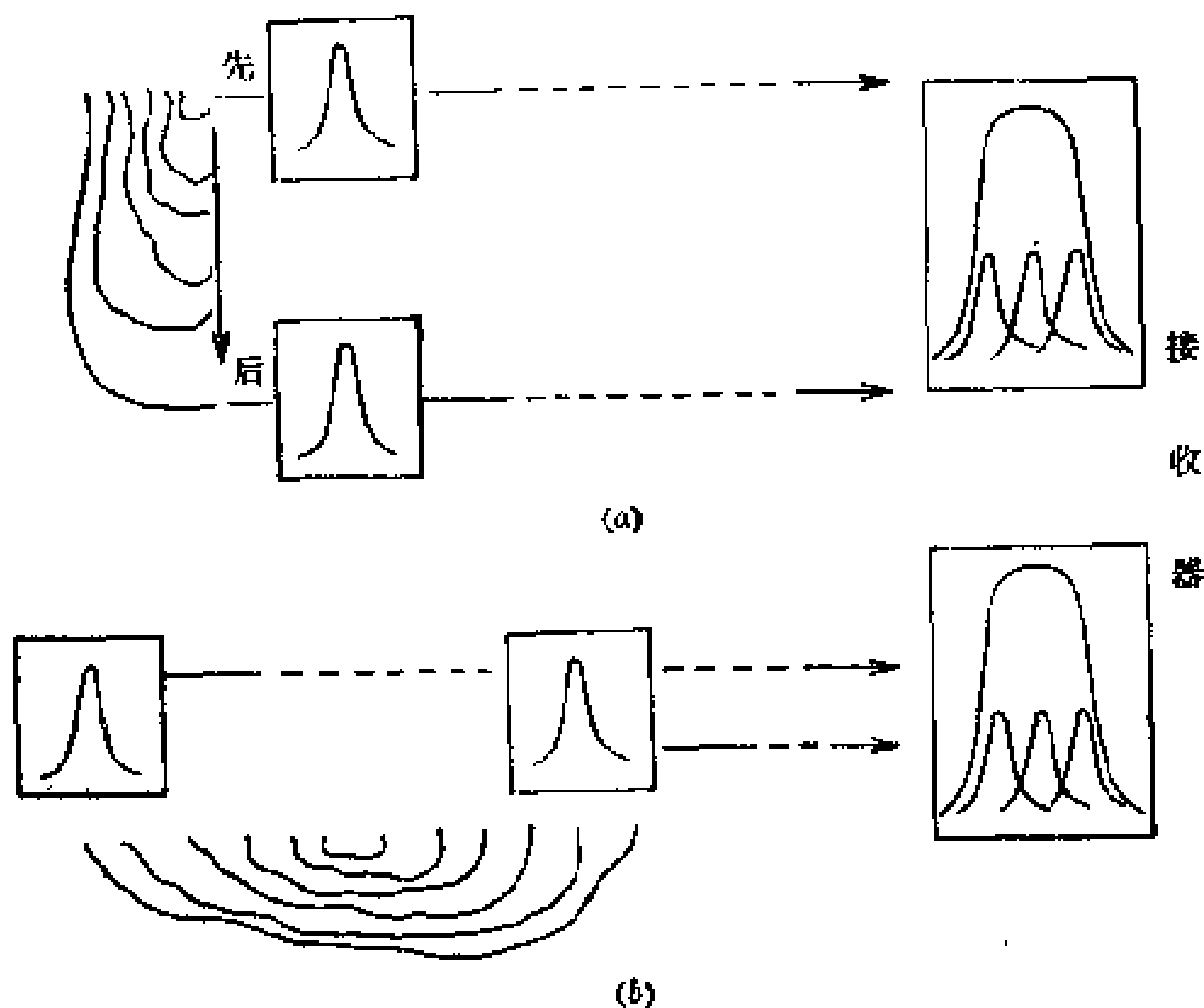


图 8.7　尺度较大的源不可能产生迅速短暂的变化信号。因为发射信号的"指令"在源中传递需要时间 (a)；而且源的各部分到观察者的距离也有差别 (b)，这两个原因使原来狭窄的脉冲变宽了

尺度上限一经确定，类星体的大能量和小体积的矛盾就突出地摆在人们面前了。巨大的能量是如何装在这么小的体积内的呢？又是怎么释放出来的呢？假定类星体也象普通星系一样是由恒星的热核反应提供能量的，因为一个普通类星体要比银河系所产生的能量大上百倍，所以就要求把比我们银河系多得多的恒星拥挤在几个光年的范围内。这是难以想象的。况且，也没有证据表明类星体的质量比星系要大许多。

因此，看来类星体产生能量的机制应该比热核反应在效率方面高得多。于是有些人自然地想起了超新星爆发的释能过程。这种"超新星假说"认为，在类星体中，恒星密度高到几乎每天都有恒星相撞的事件发生。当两个恒星相撞时，可能

会组成一个大质量的星。而大质量星的演化比小质量星要快，所以它很快烧尽核燃料而演化到超新星爆发的阶段。超新星的能量输出比普通恒星要高得多，而且持续若干月之久。只要假定类星体每天爆发一个超新星，就可以解释一部分类星体的巨大能量了。不过对于更大的类星体，这种假说还是无能为力。另一种理论推测，类星体中心可能有一个几亿倍太阳质量的中子星，其自转周期为几百天。但这种猜想不能回答这么大型的中子星何以能够产生和维持平衡与稳定；它只是凭空把中子星的模型放大了几亿倍而已。

有人又提出了正反物质的湮没假说。我们知道热核反应只能把物质的静质量的百分之一转换成能量，而正物质和反物质的湮没却可以把全部静质量变为辐射。例如恒星内部每个质子通过热核反应产生约7兆电子伏的能量，而一个正质子和一个反质子湮灭所产生的能量达913兆电子伏。所谓反物质粒子，大致来说，就是其它性质与通常物质粒子一样，只是电荷符号等性质相反的粒子。例如，反质子带有负电；而电子的反粒子——正电子却带正电。物理学家已经在宇宙线和高能加速器中找到了这种反粒子。可以想象，反粒子会构成反物质的原子，例如一个反质子同一个正电子结合成一个"反氢"原子，如此等等。如果类星体中同时存在着物质和反物质，两者相遇，便会发生猛烈的爆发——反物质和正物质同归于尽而变为光。这样的释能效率当然是不能再高的了。可是反物质从哪里来呢？如果反物质在类星体形成时就存在，它又怎么能同正物质长期共存，而直到今天还在反应呢？看来，这种湮灭太快了，不能解释今天还能看到数目众多的类星体。

面对这种种碰壁的境地，科学家又联想到活动星系核中的能源问题上的困难，提出了统一解决类星体和星系核能量

来源的意见。观测表明，类星体和活动星系核之间确实存在着惊人的相同点和互相联系；这一点我们下面还要细谈。因此，今天有不少科学家认为，在类星体中和在活动星系核中产生能量的是同一类型的“机器”；由于规模不同，这种“机器”的能力可以上下相差一百倍。至于这种“机器”是什么东西，各有各的说法。我们已讲过，关于星系核中心的能量来源，一种很有吸引力的假说是它中间有一个黑洞。因而很自然有人提出类星体内也是黑洞在作怪。要产生类星体的能量，大约需要有 $10^7 \sim 10^9$ 倍太阳质量的黑洞；这同一个巨型星系核中的黑洞大小差不多。同时黑洞尺度很小，也就满足了类星体能源的要求。当然，同星系核中的情况一样，能量如何转变为辐射的过程还有待查明。

演化的猜测

天体物理学在一个方面有点象生物学，它不仅研究事物的现状，探求它的本质，而且研究它们的来历和变化。往往是在研究演化中来追寻事物的本质。

抱着这样的观点，我们来综合考察一下上一章及这一章介绍的形形色色的天体现象：首先是正常星系，象我们的银河系就是一个其貌不扬的正常星系。上一章谈到，银河系的核心区也有射电和红外发射，那里恒星密度相当高，银河核也有爆发的迹象。不过这样的活动同其它活动星系和类星体之类的活动相比，只能算是低水平的、温和的小小波澜而已。上一章，我们还介绍了 M82 那样的活动星系，它的外表看上去有明亮的纤维结构，是气体被星系核抛出的迹象，它的射电、红外和 X 射线发射都比正常星系要强。如果将我们银河系的活动加剧十倍，它的样子就会同 M82 很相象。上一章，我

们还介绍了 M77 和 NGC1275 等这样一些赛弗特星系，它们属于天上最明亮的星系之列。赛弗特星系的射电和红外发射水平又要更上一层楼，抛射的气体也更猛烈。赛弗特星系还有一些特点，它的核心十分明亮，光谱有发射线，其辐射还表现出强烈的波动。最后，在这一章，我们介绍了谜一样的天体——类星体。它体积小、能量大、光谱有发射线、亮度的变化迅速。对上述一些不同类型的天体标本，从演化的角度来看，能不能看出一点头绪来呢？

如果把我们的处境同面对一大堆出土的古生物、古人类化石的考古学家相比较，倒是十分有意思的。考古学家在发掘中东找到一个头骨，西挖出几颗牙齿，把各种线索积累起来，比较各种标本的异同，设法拼凑一幅完整的生物进化图象，当然免不了有许多不清楚的环节，在以后的发现中来加以补充。考古学家推算古生物生存时代的基本办法是看标本的出土地层。他挖得越深，得到的化石将越古老，他断言上层出土的生物可能是下层出土的生物的后代。……如果不习惯于作历史考察的天文学家和物理学家向考古学家们学习，他们就会发现：从正常星系到类星体之间，活动水平有着从低到高的连续变化。正常星系和活动星系除了活动程度差别之外，其它方面的共同点很多，把正常星系的活动程度放大，似乎就能得到活动星系。面类星体和赛弗特星系也有许多共同点：迅变的亮度，明亮的发射线等等。如果把赛弗特星系放到类星体的红移所标志的距离上，也许人们会误以为它就是一个类星体（见图 8.8），因为在那么远处，只剩下明亮的核能被看见，星系的外围已无法看见。如果对这一点印象还不够深刻，那么我们再来看一看所谓的 N 型星系，这种星系数目不多，它的星状核比赛弗特星系亮而比类星体弱；而它的暗而小的

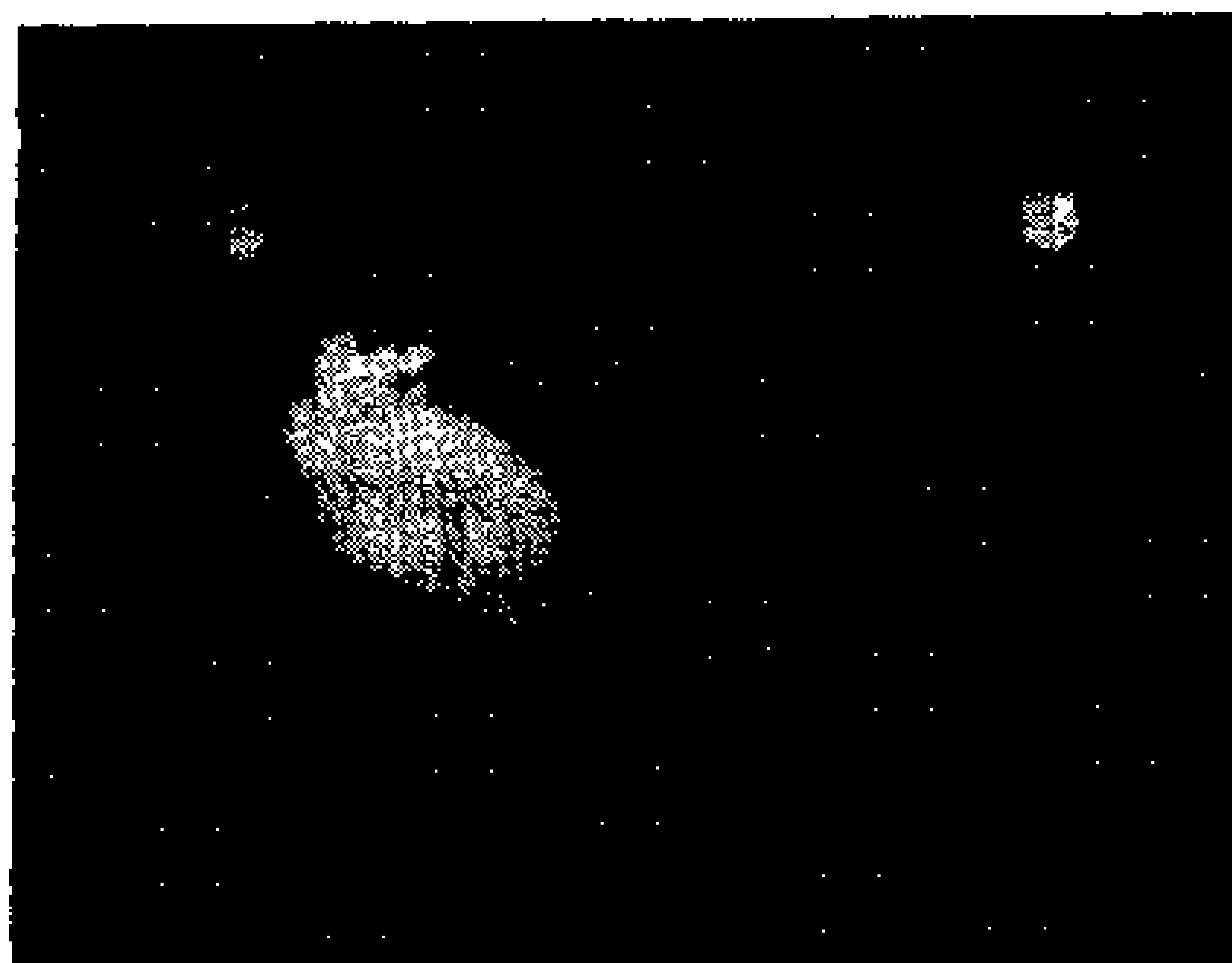


图8.8 一个典型的赛弗特星系NGC1068有明亮的星状核,又是强射电源及红外源

云雾状的外围区域似乎也刚好介于看不见外围的类星体和赛弗特星系之间。事实上,就是射电星系和类星体之间,也存在着相似的地方,比如两者都有双源结构。我们在上一章已经看到,双源射电结构是射电星系的一种常见形式,而对类星体的详细观察也发现了类似的结构。正是这种类似点启发人们统一解决各种天体的能源问题。从演化的角度看,这些相互没有截然界线的现象其含义也是十分明显的:它们可能是自然界星系这一层次上演化过程的不同阶段的表现。考古学家根据出土化石的地层深度来判断化石的年代,在天文学中也有相对应的办法,就是根据天体现象的距离来判断它的年代。因为我们今天接收到的光是已走过在宇宙空间中的漫长旅程才到达地球的。光源越远,光线就出发得越早,它所传递给我们的信息也就是越久远的古代的情况。例如三十亿光年远的天体,我们现在看到的是它三十亿年前的情景。类星体的距

离如果真是红移所标志的那样，那么它就应当是我们所看得见的最远的天体，因而也是最古老的天体。类星体计数同红移的关系似乎进一步证实了这一点：红移小的类星体不多，随着红移增大，类星体也增多，大到一定程度又稀少下来。解开类星体光谱之谜的施密特最近统计了大量的类星体，以期测定不同时代类星体的空间密度。他证实过去类星体比今天稠密得多，在160亿光年的远处，类星体密度比我们的附近要大一千倍。今天已不可能形成类星体，所以近处的类星体真是凤毛麟角。如果说，类星体是星系层次上的焰火表演的话，那么辉煌灿烂的时代已经过去，我们是生活在这场表演的结束阶段。不过我们还来得及找到一些近处的类星体来作仔细分析。最近，天文学家发现了一个距地球不到十亿光年的星系，称为ESO113-IG45。原先有人将其光谱归入赛弗特星系一类。在短时间曝光的照片上，它与一颗星无法区别，光度测量证明它的颜色同类星体一样，有10天内改变0.2等的迅速变化。这些都说明它应属于类星体，但它同时又有发育得很好的旋臂。可以猜想，也许大多数、甚至所有类星体都是有外围部分的。只是因为遥远，而且核区特别明亮而遮掩了这个外围发出的光，以致我们只能看到一个点状的核。可是这样邻近的类星体就好比古代幸存下来的活化石——熊猫一样，是极为稀有的，还需要寻找更多的例子来作证据。

在类星体和赛弗特星系之间既然有这样一种亦此亦彼的关系，于是有些人便主张赛弗特星系是从类星体演化来的，赛弗特星系衰老，就变成较为平和的活动星系，最后变为普通星系。从这个观点出发，可以认为我们银河的活动性是它在“年轻”时候的狂暴性情的遗风。当然实际的演化途径肯定要复杂得多。正如考古学家发现的许多类人猿头骨并不都是人类

的祖先的遗物，有些类人猿的后裔今天可能已经灭绝了一样。类星体可能并不全都演化为今天的普通星系，而有的星系也许不是从类星体发展来的。但也许至少可以说，一部分星系是从类星体演化来的。

考古学上经常会有一些新发现，给原来的演化序列中的空白填补新的材料，或者迫使人们修改原来的顺序。天文学中新发现的蝎虎座BL型天体就是一种新材料，第一个这样的天体是在蝎虎座中发现的，因此而得名(图8.9)。发现迄今还不到十年。同类星体一样，蝎虎座BL型天体的发现也是从射电观测开始的。这种天体的与众不同之点在于它的发射强度随频率升高而增大。第一颗被发现的这类天体VRO42.22.01在2.8厘米的短波处，是天上最强的三十个射电源之一。经光学证认，它是一颗14等星。在射电源中，这是少见的光学亮度。此“星”同类星体一样，也是点状，辐射有强偏振。经长时间曝光照相，发现它周围还有一些昏暗的晕。查找过去的记录，才发现这颗“星”早在1929年就被登记为一颗变星，因为它的亮度在一周时间内可变化百分之一百，几个月内改变十五倍。它最亮时，能超过所有类星体。其光谱与任何天体都不同，没有发射线，也没有吸收线。从长时间曝光

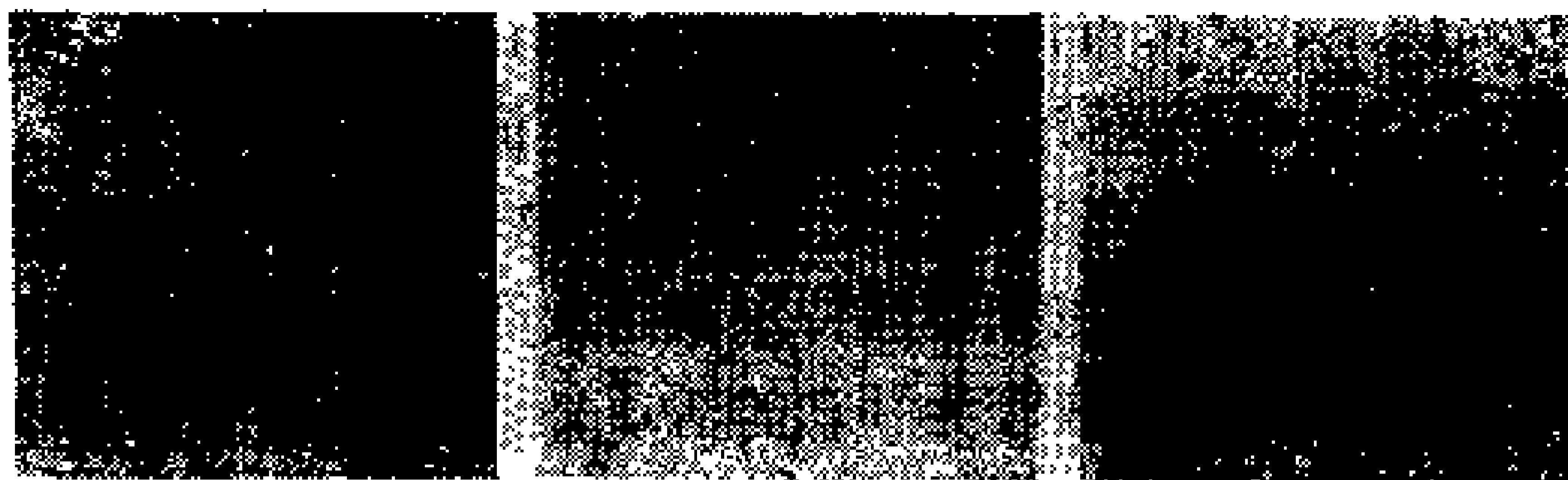


图8.9 蝎虎座BL的照片，左边的照片是1973年9月25日所摄，中间的照片是大约两个月以后拍摄的，亮度变为原来的四倍。右边的长时间曝光照片上，可以看出有模糊的外围，形似巨型椭圆星系

照片看，它象赛弗特星系；从明亮的核呈现点象等方面看，又象类星体。但又与所有这些都不同，因此是一个"四不象"，是一个新品种。蝎虎座BL型天体的最头痛的问题是没有谱线，无法从红移来估计距离。为了测到谱线，有一个研究组把一片蒸镀有铅斑的玻璃放在望远镜焦点上，将核区的光遮掉，只让周围模糊区的光进入仪器。于是，它呈现出一个类似于椭圆星系的光谱，其中谱线的红移为0.07，标志该天体距离约为十亿光年。另一组科学家对另一个这类天体天秤座AP也进行了观测。他们耐心等待了三年，抓住它核心变得最暗的机会摄制了光谱。光谱出现了普通星系那样的吸收线，根据红移估计距离也是十亿光年。看来，这是一个大椭圆星系。这些已测得红移的蝎虎座BL型天体距离似乎比类星体近，但它们肯定只是最近的天体。对更远的天体，要接收到它周围部分的光谱是极困难的，可以设想，在更远的距离上，一定有更多的蝎虎座BL型天体。

同类星体相比，蝎虎座BL型天体的光变要快10倍。如果看一下那种光变最快的类星体，发现它们的颜色也较红，偏振更强，似乎有点象蝎虎座BL型天体。上面看到，蝎虎座BL型天体似乎是椭圆星系加上一个超亮的核构成的；反过来，有些邻近的椭圆星系核也比较亮，有微小的偏振，有一个射电星系核变亮时也会呈现出无谱线的光谱。这样，在我们关于演化的总图景上，又添了一个新的因素。看来，类星体和蝎虎座BL型天体都是核区小而亮的原始星系；类星体似乎与赛弗特星系、旋涡星系有关系，而蝎虎座BL型天体则和椭圆星系有关（见图8.10）。当然，这幅图景仍是十分粗糙的，还有大量细节需要补充，很可能还要作根本性的修改。毕竟，我们人类对于自己的起源还没有完全弄清楚，而对于遥远的

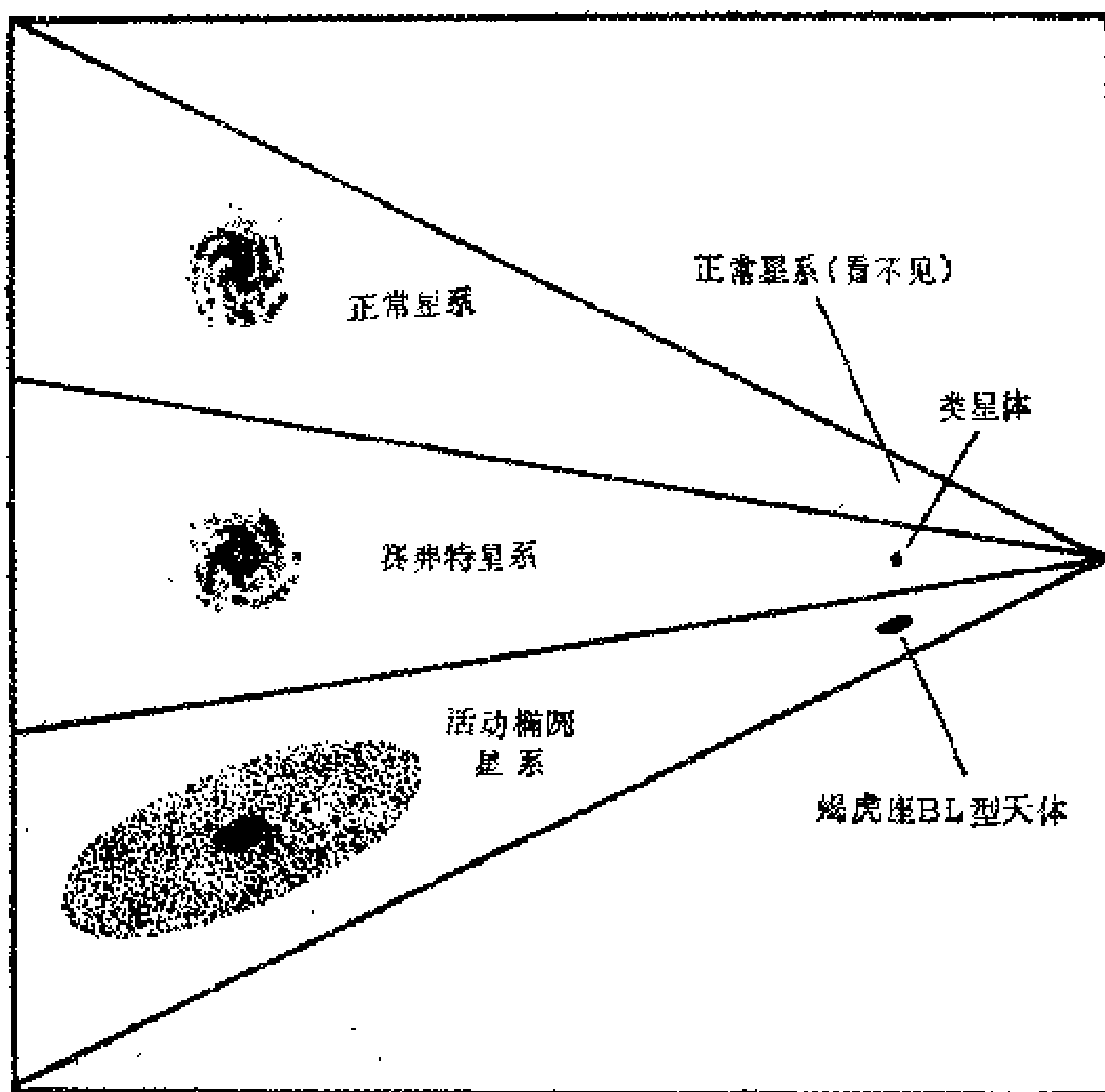


图 8.10 关于类星体以及其它一些天体间联系的猜测。旋涡星系——赛弗特星系——类星体。椭圆星系——蝎虎座 BL 型天体，这两个序列在空间上一个比一个远，在时间上也越来越古老

星系的演化却已经搜集了足以让人提出种种猜想的材料；这应该说是天体物理学的巨大成功。当然，这样的成功是不会让科学家感到满足的，他们将继续向前探索。

第九章　行星际-恒星际-星系际

我们生活的环境——日地空间

日地空间，作为一个科学名词，使用的时间还不长，许多人不熟悉它的含义。其实很简单，它指的就是太阳和地球之间的空间。人们常说，地球是我们的家园，太阳是能量的来源，因此，至少在广泛的意义上，日地空间就是我们生活的环境。

太阳和地球相距一亿五千万公里，在这广阔的空间里，有什么形态的物质？有哪些自然现象？它们与人类的生活有什么关系？这些问题很早就引起了人们的兴趣。可是真正成为一门独立的学科，还只是近二十年的事。这主要是因为，在二十多年前，人们对高空可望而不可及，只能在地面上作些间接的观测，得到的知识就比较有限，而且粗糙、片面。自从有了火箭、人造卫星和宇宙飞船等等新的运载工具，人类才有可能直接深入到外层空间里去探索。今天，人们已经在日地空间中发现了许多出乎意外的现象，大大丰富了我们对这个空间环境的认识。

日地空间大体可以划分成两个势力范围，一个属于地球，一个属于太阳。地球的势力范围很小，只有它附近的几十万公里，也就是不到日地距离的百分之一，其余的范围全属于太阳。古希腊的亚里士多德曾经主张，月亮以下是地的世界，月亮以上是天的世界；如果把这个界限作为日地空间两个范围的分界线，在今天来看，大体上还是正确的。不过亚里士多德

接着说，天界是由一种地上没有的、神秘的"以太"构成的；这就完全错了。天体物理早就证明，构成太阳、恒星以至更遥远的星系的物质丝毫也不神秘，空间的直接探测更证明了在月亮之上的空间中，充满着一种电离了的气体。电离气体由正离子和电子构成，它的行为与通常的固态、液态和气态是大不相同的，有人也把它称为物质的第四态，给了它一个名称——等离子体。等离子体能导电，能够维持自己的磁场，还可能产生电磁波。

地球就是在这样一种等离子体环境中环绕太阳运行的。这种等离子体介质的密度是每立方厘米10个粒子。我们大气在海平面处的密度是每立方厘米 27×10^{18} 个分子。所以在行星际空间，物质密度几乎是等于零。有人会以为如此稀薄的介质不会有什么作为，那就大错特错了。正是这种稀薄气体和磁场的相互作用，产生了形形色色的效应，如无线电通

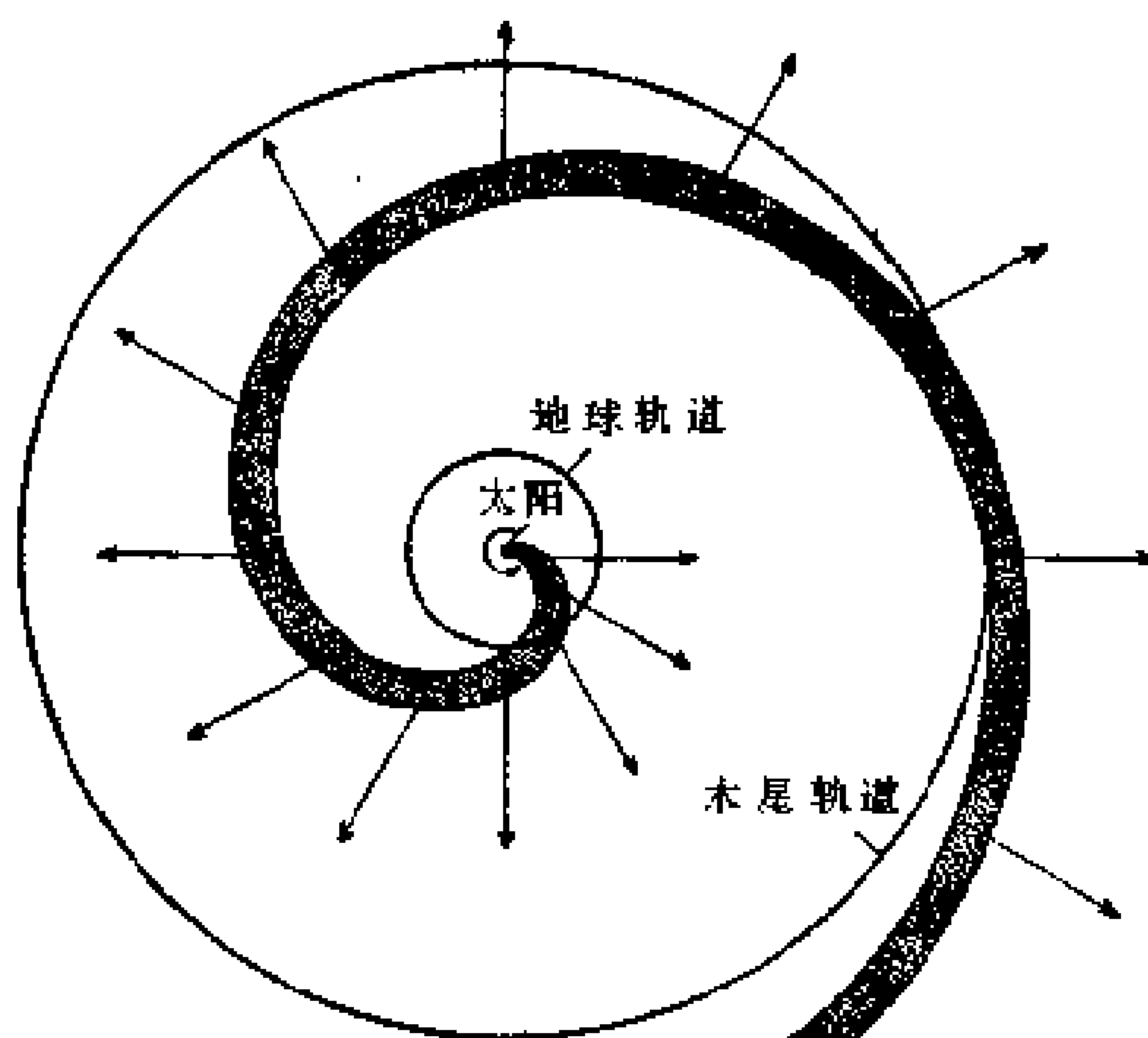


图 9.1 太阳风是一种带电粒子流，从自转着的太阳流出，呈螺旋线形状

信的干扰等等。因此人们对太阳周围广大空间中的介质进行了详细的研究。

现在知道，日地空间中的这种等离子介质是从太阳以“风”的形式“吹”出来的(见图9.1)。太阳有着称为日冕的炽热大气层，它的温度高达1～2百万度K。1958年，美国物理学家帕克(E.N.Parkor)根据流体动力学理论提出，日冕不可能静止，而是处于流动的状态。因为日冕气体温度极高，即使在离太阳相当远的地方也不可能把气体压力减小到和恒星际气体压力相平衡的程度，于是日冕不断扩张到太阳系外的星际空间中去，而新的物质则从太阳大气低层流入高温日冕区对它进行补充。于是在太阳系空间中，形成了一种不断向外吹的风，这就是太阳风。我们的地球就在这风中绕太阳不息地运行。太阳风的存在，很快就为人造卫星的直接观测证实了。

文学作品常用“风和日丽”来形容好天气，但在日地空间中，却从来没有这样的好“天气”。太阳风没有和煦的时候，更没有停止的时候。按照天体演化的理论，目前还是太阳风比较温和的时期。如果回到几十亿年前太阳初生的时候，或者到太阳进入晚年的时候，太阳风要强大得多。现在的太阳风有多大呢？我们知道，地面上的风速不超过每秒十几公尺或几十公尺。但是吹向地球的太阳风，速度在350～800公里/秒之间，比地面上的大风要快几万倍以上。如此强的风，会把空间中许多东西刮跑。看见过彗星的人，都会对彗尾留有深刻的印象，有的彗尾又长又直，背着太阳，这就是由于太阳风向外猛吹造成的(见图9.2)。地球同样也遭到太阳风的强大压力，所以同彗星相类似，也拖着一条背向太阳的尾巴，这条尾巴有几百万公里那么长。不过这条尾巴主要由磁场和稀薄的带电粒子构成，它不发光，用肉眼是发现不了的。

太阳风中的主要成分是电子和质子，也有少量氦离子。因为它是一种等离子体，所以太阳风夹着磁场。由于太阳本身也在自转，太阳风等离子体和磁场都呈螺线形向外延伸。磁场强度为十万分之六高斯。太阳风中还存在着各种大小尺度的结构，如高速粒子流、行星际激波、磁流波引起的起伏、等离子体湍流等，它们与太阳本身的活动密切相关，并对地球附近的环境有着显著影响，如产生地磁暴、极光、电离层暴等地球物理现象。同时，太阳风中那些太阳爆发时发出的高能粒子流，还能摧毁有机体，这是人类进入太空所必须考虑的一个问题。



图9.2 彗星，彗尾由太阳风吹出

除了以上太阳微粒以外，危及人类安全的还有太阳光中的紫外线，X射线等成分。所谓太阳是万物生长的源泉，只说对了一半，不除去对人类有害的成分，暴露在太阳辐射中的生命是难以存活的。这也是其它行星上没有生命存在的重要原因。值得庆幸的是，地球附近的空间把太阳辐射中的有害成分都拒之门外，使生物和人类得以生长繁衍。地球的空间势力范围是如何完成这样一个任务的呢？原来，它设置了一道道防线，把不利于生命的成分都挡在外面。第一道

防线是地球磁场构成的。在地面现象中，地磁场的效应是很小的，只有用指南针时才会感到它的存在。但是，在地球上空1000公里以上直到数万或数十万公里的范围，地球的磁场起着主宰的作用。因为在那样的地方，物质都处于等离子体状态，磁场对带电粒子的作用比地球的引力作用要强得多。整个由地球磁场控制的区域，叫做磁层(见图9.3)。对于太阳风来说，磁层就是一堵挡风的墙。太阳风受阻于磁层，大多数粒子只能沿着磁层的外围滑走而不能进入地球。而磁层在太阳风的冲击下也形成一种拖着长尾巴的水滴形状，在向阳的一侧，它只能伸展到十倍地球半径处，而在相反的方向上则可以延伸到三十倍地球半径处。由于太阳的活动，会产生太阳风中的“阵风”，磁层与太阳风的界面也会随风的强弱而进退。

日地空间中的高能粒子，也有少数能突破磁层屏障而闯进磁层内。但一旦进入磁层，它们会被磁场所俘获，囚禁在离

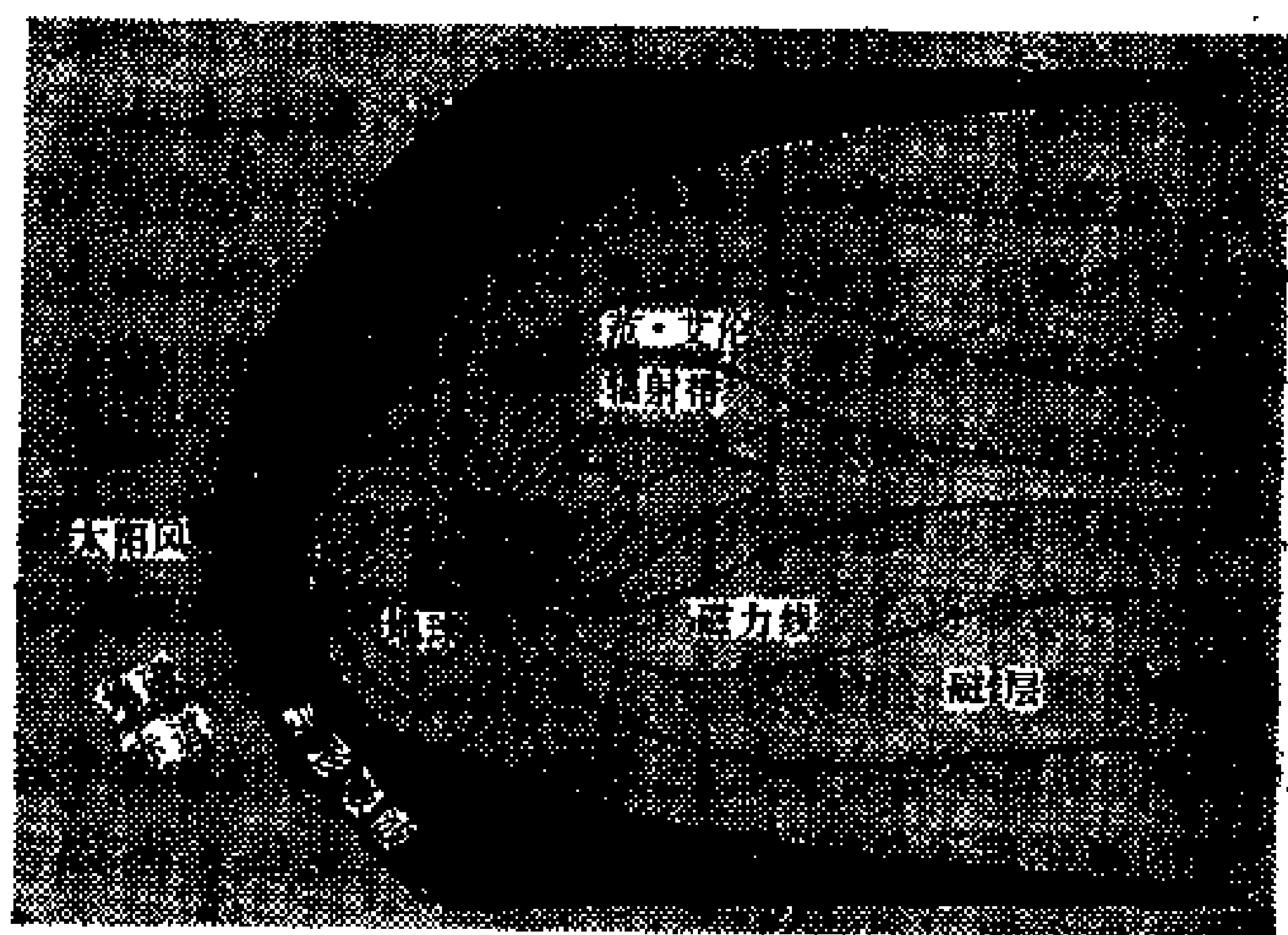


图9.3 磁层和辐射带

空中。早在二十世纪初，就有人预言地磁场俘获高能粒子的可能性。1958年，美国发射的"探险者1号"卫星带着探测宇宙线的计数器上天，它的近地点是354公里，远地点是2555公里。每当卫星进到700公里以上的高度，探测粒子的计数器就会失灵，可是回到700公里以下又能恢复正常。负责这项实验的范艾伦(Van Allen)正确地认识到，这是由于那里粒子数过多，计数器跟不上一下子涌入的粒子所造成的。如此大量的粒子就是地磁场的俘虏。后来把这个"俘虏营"称为辐射带。辐射带分为内外两个，内辐射带位于600～10000公里的高度，外辐射带位于10000～60000公里的高度(见上图)。

在磁层以下，是地球的第二道防线，这就是地球的大气。阳光中的有害成分，主要是靠大气来挡住的。地球的大气从地面一直延伸到大约1000公里的高度。日常熟悉的风云雷电现象，只发生在大气底层十多公里的高度以下。它称为对流层，是气象学的研究对象。上层大气的物理性质与底层很不一样。比如，在六十公里高空，空气相当稀薄，组成大气的氧、氮、氢等分子在太阳紫外线、X射线照射下会发生电离，形成所谓电离层。电离层能反射一定波长范围的无线电波，所以才能实现短波通信。电离层削弱了太阳辐射中的有害成分。剩余的紫外线由臭氧层来消灭。在电离层以下的区域中，太阳辐射的作用在大气中产生微量臭氧。尽管臭氧的含量只占空气的四百万分之一，它吸收紫外线的本领很强，以致太阳辐射中的紫外线很少能到达地面。在地球的早期，大气中缺乏氧，也就不会有臭氧层，那时，地面上很难维持生命现象。有的演化理论猜想，那时生命现象都发生在水里，因为水也是吸收紫外线的有效物质。

总的来说，日地空间是由太阳风、磁层、电离层以及低层

大气组成的，各部分依照动力学和热力学的过程相互联系着。因此，只要在一个环节上偏离了平衡，就会影响到其它环节。这里，太阳的状态起着主导的作用。破坏平衡的事件在太阳上是时常出现的。例如太阳时常有大大小小的爆发活动，使太阳风的强度、方向和粒子能量发生变化，太阳风的增强会使磁层收缩，进而又触发磁层中的爆发，称为磁层亚暴的一种活动就属于此情况，它会使人造卫星带电而被损坏或击毁。太阳活动对电离层的骚扰会影响短波通信，严重时会使通信中断。太阳活动也会通过一系列环节影响低层大气，造成气候异常或剧变。所以日地空间是我们生活的环境，这句话一点也不夸张。

来自星际深处的激光

当我们从日地空间转向星际空间时，先要谈谈激光，有人也许会觉得这是一个毫不相干的题目。

激光技术自诞生以来，它在科研、工业、军事、医学等方面正在获得越来越多的用途。人们对它也已经不陌生了。在介绍激光的时候，常常会谈到它的单色性、能量集中等优点，这些是天然光和其它人工光所难以具备的。这样的说法固然不错，但往往也会造成一种错觉，以为只有在人类文明发展到二十世纪六十年代的水平，才有可能构思和研制出激光器，这当然是人类智慧的结晶，自然界是没有能力产生出如此高度复杂的技术成果的。天文学的观察证明了上述看法未免有点“夜郎自大”。在广阔的星际空间，自然界有着它的巨大而巧妙的“激光器”。不过这种激光器不是在可见光波段工作，而是在微波波段工作。所以它有一个专门的名称——脉泽。

最早正确认识到这一点的，是激光物理学的先驱者之一，

美国物理学家汤斯。早在五十年代探索激光原理的时候，他就指出，宇宙空间中的分子在红外和无线电波段上可能会有脉泽那种行为。只要把射电望远镜调谐到相应的频率上，就不难接收到这种异样的信号。但是茫茫太空，到哪里去寻找天然脉泽呢？

宇宙中哪里去找分子呢？恒星上是不可能有分子的，因为那里的高温会破坏一切分子。可是1937年，在某些恒星的光谱中竟有很特别的甲川分子 CH 和离子 CH^+ 的吸收线，不过事情很快就弄明白了：这些分子不是在恒星上的，而是处在恒星与我们地球之间，星光穿过它们时便在光谱中形成吸收线。这是第一次证明星际空间中有分子存在，在人们中引起了震动。不过后来很长一段时间，在星际空间中寻找分子的工作没有进展。其原因主要是，分子都存在于气体和尘埃构成的云中，如果云过于稀薄，分子就不能造成显著的谱线，而云过于浓密，星光就会完全通不过。射电天文学的兴起使事情有了转机。1963年，射电天文学家发现了一种新的星际分子——羟基 OH。不过当时天文学家都为类星体的发现而激动，星际空间中发现几个双原子的分子，并没有引起特别的注意。

这个首次用射电方法观察到的分子是在著名的猎户座星云里发现的，它吸收了通过星云的无线电波，在18厘米波长处形成一条吸收线，对应的频率是1667兆赫。1965年，加利福尼亚大学的天文学家在一篇报道中说，他们在猎户座星云中寻找羟基吸收线时，发现了出乎意外的强发射线，其频率是1665兆赫，它也是羟基的谱线之一(见图9.4)。但平常情况下，这条谱线的强度应比1667兆赫的谱线强度小一半；而实际测量中，1667兆赫的谱线却完全看不见。1665兆赫的强

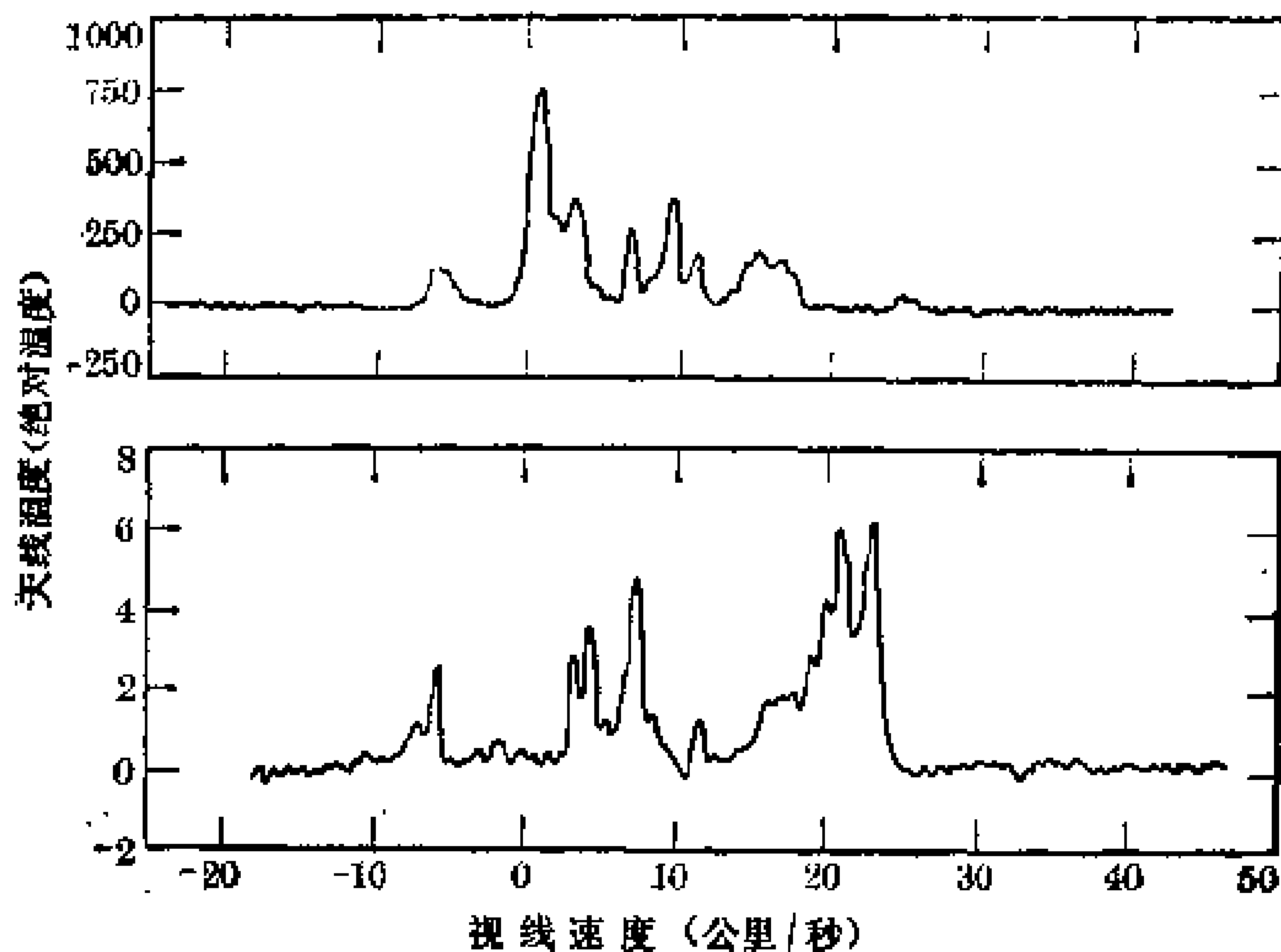


图9.4　猎户座星云中水(上图)和羟基(下图)的发射谱线，纵坐标为天线温度，由此推出它们的温度在10^{13}度以上。说明它们的发射不是热机制，而是"脉泽"

发射如果用一般的谱线发射机制来说明，就要求辐射源温度是10^{13}度K，如此高温下，分子早就破坏无遗了；而且源的强烈热运动会使谱线变得很宽，实际的谱线却并不宽。这些矛盾的现象，追使人们承认，它是一种受激发射，也就是以脉泽机制发出的微波波段的激光。于是，天上的第一个脉泽得到了确认。这样的辐射源常称为脉泽源，或分子激射源。

天文学家对星际物质的脉泽现象产生了强烈的兴趣，他们在广阔天空中开展了详细的搜索。到今天，已经发现不仅羟基能构成脉泽源，水分子、一氧化硅分子等也能构成脉泽源。尤其是一氧化硅脉泽并不出现在弥漫的星际云中，而是出现在一些恒星的外层大气中。这些恒星大多属于红巨星或

红超巨星。它们是恒星烧尽了核心部分的氢从而进入老年时代的一种坍缩前的状态。其表面温度已经降到2000度K左右。外壳膨胀到太阳直径的几百倍，而且有周期为几百天的脉动性胀缩。脉动把气体和尘埃抛到恒星的大气中，大气圈的半径可达10^{10}～10^{11}公里，比整个太阳系的半径还要大十几倍。大气中的尘埃和气体温度由内向外逐渐降低。这样的环境正是产生脉泽的温床。据估计，一氧化硅脉泽源应出现在温度为1000度K的大气层中，水脉泽温度稍低。羟基脉泽也普遍出现在红巨星或红超巨星的大气中，不过它在这种环境下的最强发射大多在1612兆赫。

来自恒星大气中的脉泽辐射，使我们对于脉泽的能量来源有比较明确的认识。表面温度近2000度K的恒星主要在红外波段发光。所以很自然会想到脉泽是由红外辐射提供能量的。对于羟基脉泽的各条谱线的强度观察，证明了这一点。至于处在星际云中的脉泽，其能量来源没有如此明确，但观测表明，这些脉泽同恒星的关系还是很密切的。它们大多出现在那种恒星正在诞生或刚刚诞生的星际云中。关于恒星演化的假说和实际观察告诉我们，新的恒星正从收缩的稠密星云中形成；当星云收缩时，引力势能转化为热能；达到一定温度，核燃烧炉点火，就开始了恒星的生命。正在形成阶段的原始恒星有着强的红外发射，脉泽可能就是从这里得到能量的。而新生的恒星能发出强紫外线，受到紫外线加热的星际尘埃颗粒又会发出红外辐射，它也能给脉泽提供能量。

总之，脉泽是大自然中一种并不罕见的现象，它可能出现在恒星晚年走向死亡的时期，也可能出现在新生恒星的摇篮里。这不禁使我们想到，太阳在五十亿年前不也是象我们今天在许多星云中看到的恒星胚胎或恒星婴儿一样吗？既然在

这些天体附近的星际介质中有不少脉泽源，那么我们的太阳星云当初也很可能发射出不少脉泽辐射的。经过了漫长的年代，作为大自然产物的人类才复制出了大自然的这个产品——激光器。

有机分子提出的问题

发射微波激光的羟基和水等分子并不是星际空间仅有的奇特现象，那里还有着形形色色的其它物质，同样引起我们的兴趣，激励我们去探索。上节谈到，射电天文学的兴起，使寻找星际物质成分的工作进入了新的时期。它的最初一批成果之一，就是发现了以原子形态存在的氢在21厘米波长处的发射，根据对氢原子分布的观察，射电天文学家第一次确定了整个银河系的旋涡结构。他们还发现，平均来说，弥漫于银河系空间内的气体温度约为100度K，密度约为每立方厘米一个原子。但是关于星际物质成分和物理条件的认识的真正突破，应该算是1968年开始的。在那以前，虽然已发现了若干分子以及羟基脉泽，但不少人认为，在星际空间这样稀薄的条件下，形成两个原子以上的分子是不可能的。即使是双原子分子，寿命也不可能长，因为紫外线和宇宙射线很容易将它们毁坏。可是1968年，汤斯等人在银河系中心区的星际云中发现了氨NH_3和水的发射信号。从此以后，发现的星际分子的数目急剧增加，现在星际分子的数目已经有五十种左右，分子量可达到一百以上。

目前已经知道，包括星际气体和尘埃的星际介质大约占我们银河系质量的百分之十，它们主要集中在银河系平面的旋臂内。但在整个星系的其它地方，也有炽热稀薄气体，温度可达几十万度，而且常处于高速运动中。它们可能是早期超

新星或其它爆发事件的产物，也可能是象太阳风一样的“恒星风”中的物质形成的。这种气体中只有电离态的原子，当然是不会有分子的。分子的存在大多是与稠密的冷云相联系的。尤其是在那种正有新生恒星诞生的星云中，有着种类丰富的各种分子。在猎户座著名的四边形中有一团新生的恒星（见图9.5），周围的气体在它们的光照下，电离成为电离氢云，在这外边是未电离的氢云。在它的后方有一浓密暗云，其中心是一个红外源——正在形成中的原始恒星。在这样的环境中，发现了许多种类的分子。大片的一氧化碳云估计共有100倍太阳质量。星云的中央还有一片小的氢氰酸的云。在红外源近旁发现了高浓度的甲醛。还有甲醇、氰基、氨等。当然，还有羟基和水的脉泽辐射。



图9.5　猎户座大星云是一种气体和尘埃云

多种星际分子的发现使天文学家和化学家大为震惊。我们知道，宇宙中除了氢和氦以外，其它元素都微乎其微，每一万个氢原子只有3～4个氧原子、2个碳原子、1～2个氮原子，

而它们在有分子的云中，丰度显然要大得多。而且，象氰基CN这样的分子是很难结合而成的，在紫外光照射下却极易破坏，它们怎么能大量存在呢？更有甚者，有些复杂得多的有机分子在星际云中比氰基更多。为此，需要拿出新的理论来进行解释。首先，分子是怎样免于破坏的呢？看来这主要是云中的尘埃颗粒的保护作用。尘埃的遮蔽能大大减弱紫外线辐射，从而大大延长了分子的寿命。分子又是如何产生的呢？关于这一点，现在还没有肯定的结论。当然，最自然的是原子碰撞结合而成的，但碰撞形成多原子分子是有困难的。因而有人又提出了原子在尘粒表面上结合而成的假说，根据一些尘埃云的密度估计，大约十万年中会有一分子在尘粒表面形成，在星际云的一生中，每个尘粒可产生好几次分子；而少量的宇宙线、紫外线和红外线对分子的形成会产生促进作用。还有一些观点认为分子是尘粒破碎而成的，或者是在原始星变成新生恒星的过程中产生出来的。当然，很可能是这些过程都参与了星际分子的形成。总之，星际化学已经形成一门学科，正在为上述种种问题提供新的答案。

研究宇宙中的化学的科研队伍中，生物学家也加入进去了。他们希望在宇宙天体的化学循环中，找到生命起源问题的线索。在这个问题上，六十年代以前的生物学家和化学家都认为地球形成之初是不会有有机物存在的。有机分子是从无机物水、氨、氢氰酸这样一些分子在紫外线和雷电作用下产生出来的。然而现在，我们在星际空间中发现了许多分子，有些还是复杂的有机分子，例如有九个原子构成的乙醇、十一个原子构成的氰化四乙炔等。它们中有一些是产生氨基酸的原料，例如甲胺和甲酸都存在于星际云中，它们相互反应能生成最简单的氨基酸——甘氨酸。又如氨基氰能与水反应合成尿

素，与氨反应合成脲。据科学家认为，这种反应在生命前过程中起着中心作用。这就给我们提出了另外一种可能性，当太阳系从原始星云中凝聚而成的时候，存在于星云中的有机分子会被破坏无遗吗？地球上最初的有机物会不会是星云中落下来的呢？对于这些问题的考虑，使有些学者提出，地球上的有机物来自天外，他们认为原始太阳云中的有机分子依靠大自然的某种保护机制未受破坏存留了下来，当地球冷却后，便以某种方式从星际降落到地面。这些天外的有机物在地球环境中变成了最初的生命物质，最后发展成为今天这样欣欣向荣的生物世界。他们有的还提出了一些根据。例如地球上的环境在最初不一定有利于有机物的合成，当合成的有机物在海洋中生成时，很快就被海水稀释掉了，不可能成为生命的出发点。而星际空间中的分子却是现成的。为此，有的人就认为，从星际分子的丰度来看，它们并不完全服从结构越复杂、数量就越少的规律，而是质量大致都相近。说明这些分子未必是由简单向复杂而合成的，倒有点象是更复杂的分子解体而成的，例如可能是多糖和纤维素的分子分解而成的。另外，从天外飞来的陨石中也分析到了有机分子。比如著名的1976年吉林陨石中，就发现了许多碳氢化合物，有十一种氨基酸，还有卟啉、色素、异戊二烯烃等多种有机物。这种种发现打破了宇宙空间不能有有机物存在的传统观念，也许会使我们关于生命起源的理论完全改观，使地球上生命与人类的演化与天体的演化更密切地衔接起来，成为整个大自然运动发展的一个环节。

下落不明的质量

银河系约有二千亿个太阳质量，如果均匀分布在银河系

空间内，那么平均密度只有 10^{-24} 克/厘米^3，也就是每立方厘米只有一个氢原子！这样稀薄的环境比实验室里的高真空还要高几十亿倍。

在更大的范围上，物质的分布情况又是怎样呢？我们知道，星系往往倾向于聚集成团。所以我们先来看一看星系团的物质分布。星系团的存在虽然很早就有猜测，但观测上的确认是在三十年代初。当时发现，有一些星系团很庞大，可以包含一千多个星系。例如较近的后发座星系团就是如此。这个星系团呈球状，说明它在自身的引力作用下已达到平衡(见第三章图)。可是根据它的发光强度来计算它的质量却发现，要使星系团平衡，这些质量还差 80～90%。随着观测的进步，这种由发光计算的质量同由引力计算的质量之间的矛盾进一步明显了。例如，离我们最近的一个大星系团——室女座星系团，1967 年发现，它的密集区外围，有一个半径 50～100 万光年的"晕"，其中的光不是由气体或电子发出的，而是由恒星发出的。要把恒星束缚在这样的晕中，需要有几十万亿倍太阳的质量，此数目比根据光度估计的质量要大几十倍。在室女座星系团的中心区，就是前面介绍过的强烈活动的巨型椭圆星系 M87。近年的观察说明，它有一个直径约 100 万光年的发射 X 射线的云，其中的气体温度约三千万度。要靠引力来束缚住如此高温的气体，M87 的质量应比从前估计的大 30 倍。其它星系团大多都有这样的矛盾。有的星系团的动力质量与光度质量之差竟达 100 倍，这就是"下落不明的质量问题"。

在广阔的星系际空间，有没有物质存在呢？这当然是天体物理学家在寻找下落不明的质量时首先想到的。他们把光学和射电望远镜指向那一无所有的空间，发现那里确实不是虚空。例如我们银河系的"卫星系"——大小麦哲仑星云之间

就有着氢原子构成的“桥”，这种“物质桥”还存在于不少其它星系之间；至于星系间物质是气体还是恒星，目前还没有弄清楚。例如在室女座星系团外围，就有恒星组成的晕。另外，我们在研究那种蝌蚪状的射电星系时，曾指出它们的拖在后边的尾巴也许是星系在星系际介质中的运动所造成的；根据尾巴的扩展程度，可以计算出星系际介质在星系团内不超过每立方厘米0.003个氢原子。在关于类星体红移的问题中，我们也谈到有些类星体有多种红移不同的吸收线，可能是星系际气体的吸收所造成的。这些证据从侧面证明了星系际物质的存在。星系际气体如果存在的话，应有一亿度K的温度，能发射X射线，射线强度与观测的事实是一致的。根据对类星体吸收线的研究，我们估计星系际介质的密度不超过1.5×10^{-13}个原子/厘米^3。这样看来星系际物质虽然是天体物理学必须考虑的一个因素，对于质量的贡献却嫌太小，不能完全解释“下落不明的质量”。

根据现代物理学的观点，辐射也是一种物质形式，它们对质量有什么贡献呢？在星系际空间，有各种星系发出的光，要测量这样的光是很困难的，必须除去银河自身等的星光的干扰。天文学家经过努力，还是得到了比较可靠的结论，星光在星系际空间的密度是1.5×10^{-14}尔格/厘米^3。另外，星系际空间还有将在下一章谈到的微波背景辐射，它们均匀分布在整个空间，是一种3度K的热辐射，它的能量密度是6×10^{-13}尔格/厘米^3，比星光大40倍。各种射电源在星系际也形成射电背景辐射，它们是非热辐射。除此之外，星系际还有各向同性的X射线辐射，它可能是各种X射线源产生的辐射总和，也可能是爆发星系的高能粒子与微波背景辐射相互作用（如逆康普顿散射）所产生的结果，不过这后两种辐射的能量密度

远低于前两者。即使是前两者那样的密度所对应的物质量密度也是不能与物质密度相比的。

除了辐射，星系际还应有高能粒子。我们从射电星系的观测中已经看到了这一点。在讨论宇宙线起源的时候，我们将要考察由星系发出质子、电子以及其它重元素核的问题。这些带电粒子在星系际空间有多大的能量密度，现在还没有弄清楚，大致范围是 $10^{-12}\sim10^{-16}$ 尔格/厘米^3。这同样也是太小而不能说明质量的不足。

当然，宇宙中还有大量的引力波、中微子以及也许还有许多黑洞，它们很难直接观察，但也许占了宇宙中很大一部分质量，这是今后的天文学的任务。随着引力波天文学和中微子天文学的进展，丢失的质量的下落也许能够找到答案。

第十章　宇宙线及其它

基本观测事实

1912年，奥地利物理学家亥斯(V.F.Hess)用气球把静电计带到了高空，发现了来自宇宙深处的神秘射线。这是一种"粒子雨"，不分昼夜地从四面八方落向地球。六十多年来，关于从宇宙中来的这些不速之客的身份和来历，曾使许多物理学家绞尽脑汁，直到今天仍然是一个没有完全解决的难题。

我们这里所说的宇宙线，是指来自天空的带电粒子，不包括各种光子、中微子等。如果用卫星或气球把探测器带上大气层的顶部或以外，就会发现这些带电粒子主要是氢原子核——质子，它占总粒子数的85%。另外氦原子核——α粒子占12.5%，其它较重的原子核占1.5%，电子占1%。今天，我们已在宇宙线中找到了元素周期表上几乎所有的核。宇宙线引起人们惊讶的最初现象之一，是它们落向地球的速度几乎等于光速，因此有些宇宙线粒子的能量是极高的，可达到$2\sim3\times10^{20}$电子伏（1电子伏$=1.6\times10^{-12}$尔格）。这种粒子虽然都是极小的微观粒子，但动能却可以同日常生活中物体相比拟。例如一个飞行中的网球的能量也不过是10^{20}尔格的数量级。我们知道，目前世界上最大的加速器可使粒子获得上万亿电子伏的能量，但是同宇宙线中的高能粒子相比，还差好大一段距离。虽然现在已有计划，要在今后十年中，把加速器输出粒子的能量提高到10^{14}或10^{15}电子伏，但建造这样的设备代价是极为昂贵的，而且该数字仍然比宇宙线达到

的最高能量低得多。这就是为什么现在高能物理学家在建造加速器的同时，也十分重视对宇宙线的研究，他们在高山顶上建造宇宙线观察站，以期获得高能加速器所不能获得的高能现象。但宇宙线的研究也有它本身的困难，这是同它的一些基本性质有关的。

首先，地球的大气总是阻挡空间中飞来的宇宙线粒子，使它们不能到达地面的观测站。例如，一个质子要从外层空间到达海平面而半路上不与空气粒子相碰，这样的几率只有百万分之一。那种进入大气层以前的宇宙线称为初级宇宙线。为了探测初级宇宙线，人们必须用卫星、气球等东西把探测仪器带上高空。如果高能物理学家想用宇宙线中的高能粒子来轰击他们的靶，就必须把靶放到高山上的实验室中。这当然造成了一定的困难和限制。然而更大的困难还在于，宇宙射线的强度是十分小的。即使是能量不大的粒子（10^9～10^{10} 电子伏），在大气层外每平方厘米上每分钟只有十个粒子通过，所以在那样的地方的一个靶，每平方厘米上接收的宇宙线能量并不比星光的能量更多。至于那种加速器不能产生的高能粒子，强度还要低得多。为了捕获到能量大于 10^{15} 电子伏的粒子，哪怕只要求每小时捕获一个，探测设备的面积也要求十平方米那么大！因此在高能物理学的研究中，宇宙线观测只能作为加速器的一种补充手段。加速器产生的粒子能量、强度是可以按人们需要调节的，宇宙线观测却只能“守株待兔”。所以在能量较低的区域，与其说宇宙线观测帮助了加速器的实验者，不如说是加速器实验帮助了宇宙线的研究者。利用加速器实验的详细而精密的结果可以来预测宇宙线粒子的行为。有时干脆把仪器搬到加速器实验室中去，把加速器粒子产生的结果同宇宙线粒子产生的结果进行对照、研究。而在

较高能量的区域，由于加速器不能提供实验资料，宇宙线的研究也还有许多未知的东西。

那么，是不是说，高能粒子就简直无法加以研究了呢？也不是的。初级宇宙射线穿过大气时固然会因碰撞而变成其它粒子，但我们就不能通过对这种粒子产物的探测来研究初级粒子的性质吗？事实上，在加速器实验中对粒子的研究，也正通过对粒子穿过探测器中气体、液体等介质时产生的现象加以测量来进行的。宇宙线的研究者就正是通过大气这个天然的庞大探测器来研究宇宙线粒子，尤其是那种能量高于几千亿电子伏的宇宙线粒子的。高能宇宙线粒子进入大气以后同空气中的粒子发生复杂的相互作用，产生一连串的反应，这些反应的产物有各种 π 介子、μ 子、正负电子、质子、中子、光子和中微子等，它们象阵雨一样泻落到地面。此现象称为大气簇射(见图 10.1)，而反应的产物称为次级宇宙线粒子。大气簇射开始于宇宙线粒子同空气中原子核的碰撞，碰撞产生出的次级粒子中很大一部分又同空气原子碰撞，产生第二代的次级粒子，如此反复进行。每次碰撞除产生一些核的碎片、质子及中子以外，还会产生各种 π 介子。π 介子的寿命很短、容易衰变，尤其是中性 π 介子最不稳定，它几乎立即会衰变成高能光子——γ 射线。这些光子带走了碰撞中的相当一部分能量，引起一连串的电子-光子级联反应。而带电的 π 介子则衰变成 μ 子和中微子。但这种粒子的寿命稍长，在簇射的早期阶段，它们能量很大，速度接近光速。由于狭义相对论中著名的时延效应，地上的观测者看来，它的寿命会比它低速运动时长许多，所以，它能走很长一段路而不发生衰变。在此过程中，它有可能同其它粒子碰撞。只有到了后期，能量减小了，它们发生衰变的几率才增大。在中性 π 介子引起的电子-光

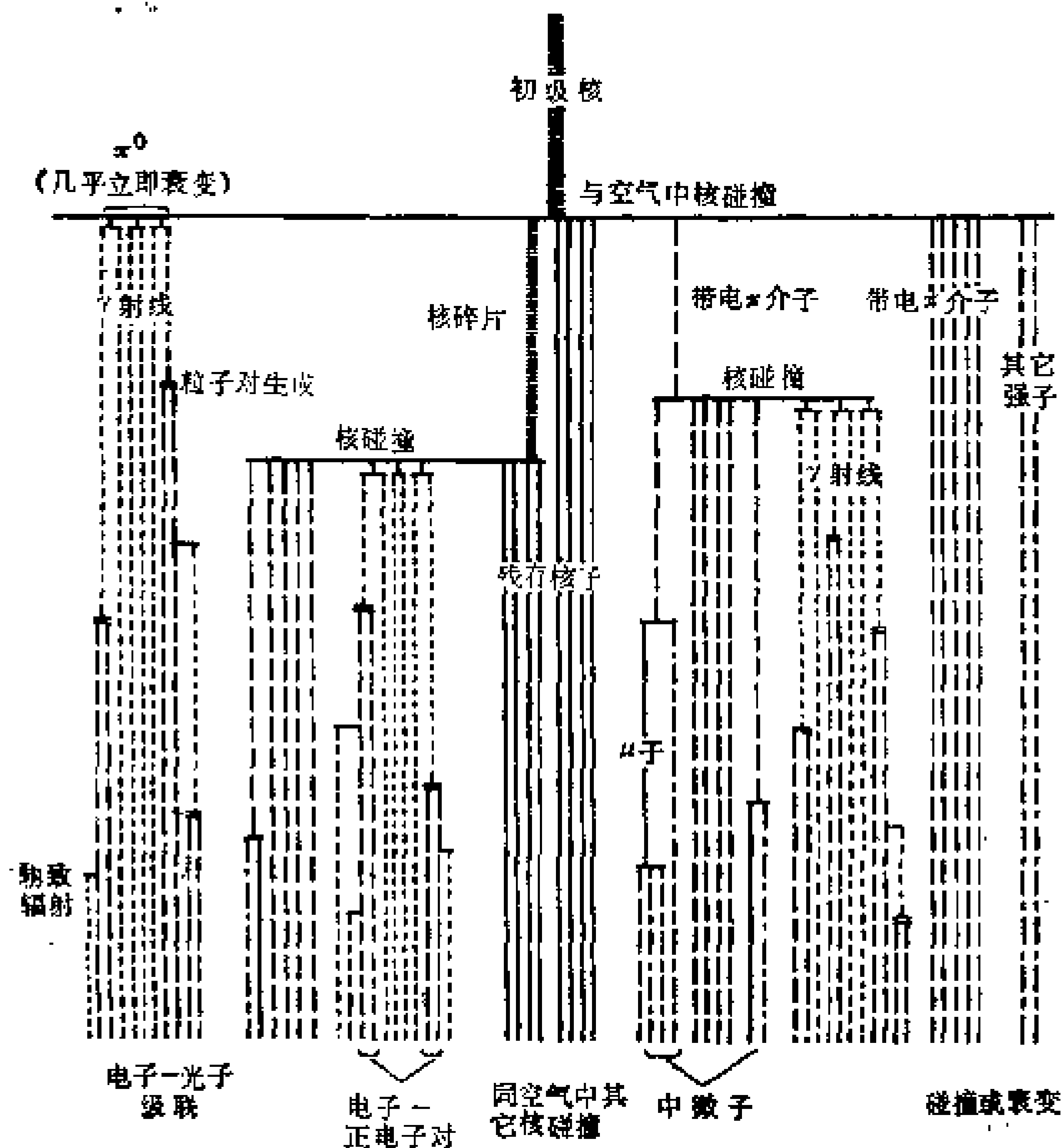


图10.1 大气簇射图。初级宇宙线中的粒子进入地球上空二十公里时，同大气中的原子核碰撞，产生出一系列其它粒子

子级联反应中，也有一连串的碰撞，不过在这种碰撞中，是高能电子和光子同原子的电场发生相互作用。开始时，碰撞反应会产生大量快速粒子。因为高能的光子遇到强电场会产生出电子-正电子对，而高能电子和正电子遇到强电场又会辐射出高能光子。但随着粒子增多，平均每个粒子的能量就减小了，于是反应逐渐告终。

一次大气簇射中，各种带电粒子中电子是数量最多的，在

地面处，它们有一半散布在直径为一百米左右的区域内，而核的碎片、核子只散布在此区域中心大约几米的范围内。由于簇射粒子的密度随初级粒子能量的增加而增加，所以对能量十分高的粒子，离中心一公里的地方仍可用普通计数器检测到簇射粒子。在大气簇射中，次级粒子的数目先是迅速增多，达到某一极大值，然后再减少。例如初级射线能量为10^{15}电子伏的簇射，最多能产生五十万个粒子！物理学家们利用分布在一定范围内的各种类型的计数器或其它仪器，再利用对数据的分析处理方法，可以计算出产生某一簇射的初级射线的方向和能量。

起源和加速

天体物理学家研究宇宙线和高能物理学家研究宇宙线，目的是不同的，在某种意义上，刚好背道而驰：后者利用宇宙线的高能现象向微观世界的深处探索，而前者却是通过对宇宙线的起源和加速的研究，向广阔的宇宙深处探索。

关于宇宙线的起源，自从宇宙线发现之日起，就开始了争论。许多知名的科学家，如测得电子电荷的密立根(R. Millikan)和发现康普顿效应的康普顿(A. Conpton)曾为宇宙线的起源问题争得不可开交。争论的焦点，开始集中在宇宙线的太阳起源说上面。持这种观点的人认为太阳的活动，如黑子爆发、耀斑等，会加速粒子，宇宙线就是从太阳那里来的粒子。这个理论的根据是，宇宙线的强弱和太阳活动似乎确有某种联系。但宇宙线基本上是各向同性的，为了解释这个现象，太阳起源说认为，在太阳周围以及整个行星际空间，都存在着磁场，磁场使高速粒子的轨迹发生弯曲，既造成了粒子的均匀分布，又把它们约束在太阳系内，造成长时间稳定的宇宙

线流。这样的理论似乎说明了宇宙线现象的各个方面，取得了一定的成功。但是五十年代初，科学家发现了一系列能量高达 10^{16} 电子伏的宇宙线，这就给太阳起源说造成了困难，因为这样的粒子能量太大，行星际磁场是不会使它们发生大的偏转的，因此不可能被约束住。而且这种高能宇宙线簇射的事例似乎还不少，也没有什么方向性。于是太阳起源说动摇了。人们把眼界转向了更广阔的银河系，提出了宇宙线的银河起源说。

银河起源说在宇宙线粒子的偏转、约束上沿用太阳起源说的论证方法，认为宇宙线粒子受银河系磁场的偏转和约束。该磁场比行星际磁场要弱得多，可是因为银河系幅员广阔，它仍能约束住能量较高的粒子。苏联天体物理学家金兹伯格(V. L. Ginzburg) 对此作了定量的分析。假定银河系内宇宙线的能量密度同地球大气层外的数值一样，即每立方厘米1电子伏，银河系的磁场强度为 3×10^{-6} 高斯。这个磁场象一个有漏洞的匣子，能把宇宙线粒子关住一段时间约为 10^6 年。为了使能量密度不致因泄漏而衰减，应以每秒 $10^{41}\sim10^{42}$ 尔格的功率向磁场注入粒子。但如果假定银河系的磁场不局限在盘内，而是成为一个球状，那么保留时间可以长达 10^6 年，这样要求的注入粒子的功率就稍小。究竟是什么东西提供了这些高能粒子呢？既然太阳对宇宙线的贡献不大，那么其它的正常恒星也不可能成为宇宙线源。因此，宇宙射线源只能到其它特殊天体中去寻找。我们知道天体发出的同步加速辐射来源于电子在磁场中的螺旋运动。既然辐射源中有大量高速电子，那么产生电子的过程为什么不能同时加速质子和其它核而使它们达到接近光速的速度呢？当然这些射电源主要是河外的星系，但其中也有一些是银河系内的，这主要是超新星的遗迹。因此，如果宇宙线起源于银河系内的话，它的主要来

源就应当是超新星及其爆发产物——中子星。根据我们的历史记录和对其它星系的观察，大约要 100 年才会出现一次超新星，根据上面的估计，就要求每个超新星贡献 $3\times10^{49}\sim3\times10^{51}$ 尔格的高能质子。超新星是否能达到这一要求，目前还没有定论。〔注〕

1957 年，正是宇宙线的银河起源说高奏凯歌的时候，一组科学家利用了分布在六分之一平方公里上的十五个闪烁计数器组成的阵列探测簇射，他们发现了一个特大簇射事例，据记录推算其初级射线能量是 5×10^{18} 电子伏。如此高的能量尽管还没有突破银河"磁匣"所能约束的能量界限，却已给银河起源说带来了一定的威胁，也给那些不愿受正统见解束缚的人带来了希望。宇宙射线，至少其中的高能部分能不能来自银河系外呢？1962 年，他们所期望的证据出现了。一个巨大的计数器阵列测得了能量为 10^{20} 电子伏的簇射；而且还发现，能量在 10^{18} 电子伏以上的宇宙线比预计的要多。这是银河起源说所不能解释的，根据此理论，当宇宙线能量趋近于银河磁场的约束极限时，宇宙线的强度应急剧减小。实际观测到的出乎预料的现象，似乎可以如此解释：来自银河系外的宇宙线能补偿从银河系磁场中泄漏出去的高能部分而且有余。越来越多的证据似乎都支持这一猜想。宇宙线的银河起源说经过这样一种修正就变得更加完善和令人信服了。

但是仍有一些理论家捍卫着宇宙线完全起源于银河的理论。他们认为关于超新星中的粒子产生和加速过程还有许多不清楚的地方，也有可能产生宇宙线的天然加速器在高能区

注：近年有人根据卫星上 γ 射线望远镜的观测结果，指出宇宙线河内超新星起源有了新的证据。他们的理由是：宇宙线同星际介质作用会产生 π 介子，π 介子衰变产生 γ 射线，卫星发现 γ 射线源的分布与超新星的分布十分一致，而 γ 射线是不受磁场偏转的，这就指出了宇宙线起源于超新星。

域效率会陡然增高，这样就不必用银河系外的宇宙线来补偿高能粒子从磁场的泄漏了。因此，为了解决宇宙线中高能部分的起源问题，需要用其它的观测资料来检验不同的理论。有一个办法就是观察高能宇宙线的方向性。因为在极高的能量下，宇宙线不会受到磁场的约束，甚至不会受到多大的偏转，所以它们的方向应当能指示出高能宇宙线的辐射源。如果它们在银河系内，那么应当集中在银河平面中；而如果它们来自银河系外的其它星系，那么它应当能指示出那些星系的位置。设立在英国电兹城外的一个大型探测阵列根据1963年以来记录到的十六个最大的簇射资料，给出了这方面一个最有说服力的证据，说明高能宇宙射线是来自银河系外的。这十六个簇射的能量全都在5×10^{19}电子伏以上，结果发现有十个簇射源位于银纬30°以北（见图10.2）。

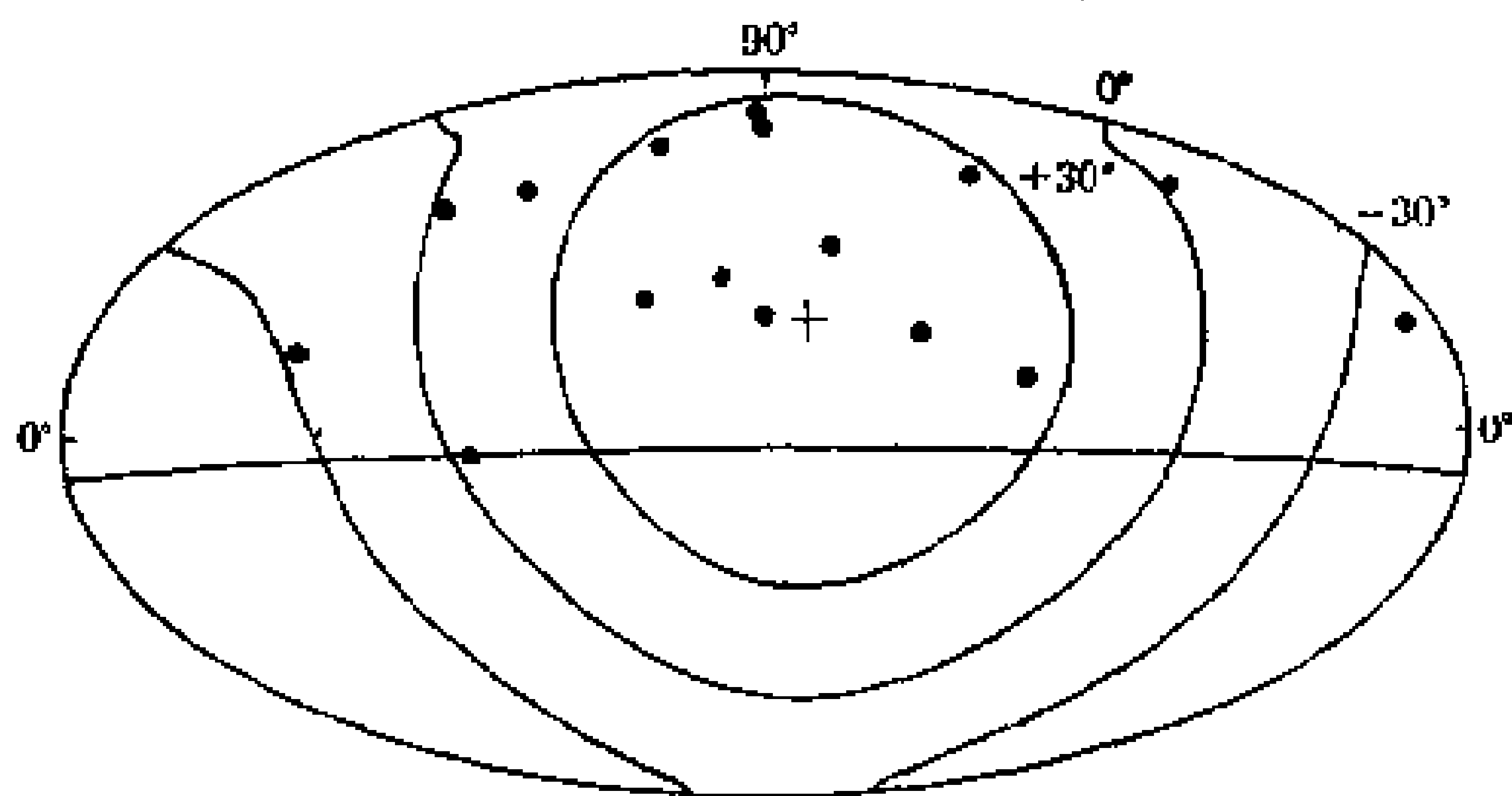


图10.2 高能宇宙线簇射的方向分布。图中"+"号处是银北极，簇射多数分布在高银纬区，说明来自银河系外

正当宇宙线的纯粹银河"血统"的维护者同"混合血统"的主张艰苦奋战时，有些人还提出了更加异端的河外起源说。他们指出，河外射电星系和类星体同样是同步加速辐射源，肯定也会使质子及重核加速。这种加速的粒子在星系际的微弱磁

场及稀薄介质作用下，逐渐均匀分布在星系团中，然后又逸出星系团，成为真正的“宇宙”射线。著名天文学家伯比奇(G. Burbidge)对我们所在的室女座超星系团作了粗略计算。室女座星系团内有六个射电星系，假定它们能量是10^{60}尔格，并假定能量大多为高能质子的形式。根据射电星系的寿命和星系团的年龄，估计它们共产生了2×10^{64}尔格的能量，如果均匀分布在星系团内的话，能量密度为0.1电子伏/厘米^3。这个数字同地球大气外的宇宙线能量密度1电子伏/厘米^{3}相比，可以看出河外射线源的贡献是不小的。不过河外起源说也承认，宇宙线中的电子是不可能来自河外的，因为电子在星系际的距离上会同背景辐射相互作用，发生逆康普顿散射而形成X射线或γ射线。

总而言之，宇宙射线虽然已有六十多年的历史，但是关于它的起源和加速的争论，仍然没有得出最后的结果。看来，宇宙线的起源和加速同银河系内外普遍发生着的高能过程是相互联系着的。对宇宙线的起源和加速的研究，将为研究这种高能现象提供线索。反过来，对超新星、活动星系等现象的研究，最终将会给宇宙线之谜带来满意的解答。

化学元素的产生

如果宇宙射线，或者至少它的高能部分，真的来自银河以外，那么这些质子以及其它原子的核可以说是来自银河系以外的唯一物质标本了。这些天外之天的来客同我们地球上的各种元素的核并没有什么两样，说明了大自然的统一性。我们的宇宙就是由这些基本的“砖块”精妙堆砌起来的宏伟大厦。在探索这座大厦的本源和来历的时候，自然会追究到这些“砖块”的产生和演化。这些无所不在的化学元素，从氢到铀以至

更重的元素，究竟是从哪里来的呢？回答这个问题，是天体物理学的义不容辞的责任。

为了回答元素的起源问题，我们先来看一下各种元素砖块在宇宙大厦的建筑材料中所占的比例。这种比例是以所谓元素的相对丰度来度量的。所谓相对丰度，粗略地讲，就是各种元素在宇宙中的原子总数的相对数值。初看起来，要了解宇宙这个庞大的建筑物的材料成分，对我们这样拘束在这建筑物的偏僻一隅的人类，任务艰巨得简直叫人灰心丧气。但坚信物质世界统一性的、意志坚强的科学家没有被这种艰巨任务所吓倒。除了收集宇宙线方面的资料，他们还通过以下几个方面来获取元素丰度的知识。首先，我们的地球就是宇宙大厦的一个普通的角落，它的组成至少可以反映整个大厦的组成情况的一些方面。我们分析了地壳、大气、海洋的组成，并考虑到一部分物质会散失到空间中去，从而大致确定元素在地球内部的重新分布，这样可以对四、五十亿年前地球形成时各种元素的比例作出估计。天外飞来的陨石，也是远古时代的遗物，它们所经历的变化比地球表面的物质要小一些，因而可以提供更为真实的材料。宇航员从月球带回的石块以及无人飞船在火星上着落后对火星地质的分析，给了我们更多的信息。对于太阳系以外的物质，人们通过恒星光谱中的吸收线和发射线以及星云发出的无线电波段的谱线来估计它们的丰度。所有这些方法，把复杂因素考虑进去后加以仔细的修正，都给出了元素丰度的大体相同的结果。这些就大大增强了我们的信心，它不仅说明了物质世界在元素组成方面是统一的，而且也说明我们的研究方法是合理的，是在向着真理前进。

这些结果告诉我们什么呢？它告诉我们，氢是宇宙中遍

遥领先的最丰富元素，按原子数算，它占93%，按重量算，占76%。名列第二的是氦，按原子数算，占7%，按重量算，占23%。这两样元素就占了整个宇宙的原子总数的几乎百分之一百，重量占了百分之九十九。剩下的微不足道的比例，就是从锂到铀的所有重元素。最重的那些元素按原子数目算只占全部原子的亿分之一，按重量计只占百万分之一。

这样一种组成，是如何造成的呢？当然，所有的核都是由中子和质子组成的。如果用前面那样的比方，可以说宇宙大厦的所有砖块都是由两种泥土的不同比例烧出来的。什么样的窑能够烧炼出这形形色色数目不同的砖块呢？

最初，美国科学家伽莫夫等人提出，元素是在较短的一段时间内同时形成的。这种主张的前提是，我们的宇宙过去曾经历过一个高温、高密度的状态，这种状态在极短的时间内膨胀开来，形成所谓的大爆炸。关于大爆炸理论，我们下一章还要专门讨论。标准的大爆炸理论与最初提出时已有所不同。伽莫夫等人原来假定宇宙在高温高密态时，全部由中子构成。当宇宙膨胀时，有些中子衰变成质子。质子立即俘获一个中子，形成氢的同位素氘的原子核，这就是比氢重的第一个原子核的诞生。氘核会俘获另一个中子而形成氚核，氚核很快释放出一个电子而蜕变为氦3。就这样，通过一连串的中子俘获和电子衰变，所有元素就在大爆炸中建造出来了。据伽莫夫说，元素形成的整个过程只有几分钟。此后，宇宙的温度下降到不能生成元素的地步。这些元素便飞散开形成星系。

这样一种高温高压窑炼制出所有砖块的模型在实验上得到了一定的支持。实验证明，几乎所有的原子核都很容易俘获中子，而根据各种核俘获中子的能力计算出的元素的相对丰度与实际观测的值符合得很好。但它也有与事实不符的一

面，而且矛盾还相当严重。这就是，中子俘获生成元素的过程很难越过氦 4 后面的两个障碍。因为质量为 5 和 8 的原子核总是不稳定的，氦 4 俘获中子而成为氦 5 以后，它立即会重新衰变为氦 4。同样的，质量为 8 的铍的同位素一经形成，也会立即分裂为两个氦 4 原子核。于是形成元素的一连串过程在这里中断，世界上不会有比氦 4 更重的核了。这不是荒谬之极吗？

因此，为了生成比氦 4 重的原子核，需要补充别的过程。科学家在恒星内部的核反应中找到了这样的过程。那是在 1938 年，贝蒂为了说明太阳和恒星中能量的产生而提出了质子-质子聚合和碳氮循环过程；这一点我们在太阳一章中已经作过介绍。霍伊尔(F. Hoyle)、否勒(W.Fowler)等物理学家认为这种产生能量的核过程在产生元素方面也起着关键的作用。1957 年他们提出了一个系统的理论来表明各种元素是如何在恒星内部合成的。该理论假定大爆炸只能生成氦以下的元素，因此，当宇宙的高温高密状态之后第一代恒星出现时，其主要成分是氢核——质子，其它只有少量氘和氦。当恒星因引力收缩而内部温度升到五百万度时，发生质子-质子聚合，四个氢原子转变为一个氦原子。这样在恒星核心部分就形成一个氦核，体积逐渐扩大，当氢燃料烧完后，该核心便冷却而收缩，其时热压力消减，引力占了优越。可是收缩又使温度上升，可能使核心温度达到一亿度左右。在那样的条件下，两个氦核合成铍 8 的速度同铍 8 分裂为两个氦核的速度一样大，于是在这种平衡中总有少量铍 8 存在，其中有一部分会俘获氦 4 而产生碳 12 的核。于是，自然界就跳过了锂、铍、硼三种元素，跳过了原子量 5 和 8 的障碍，直接生成了碳。至于自然界中存在的锂、铍、硼这三种元素可能是重元素

碎裂的产物，也说明了这三种元素的丰度特别低的反常现象。

一旦碳12得以形成，它便会进一步俘获氦核而形成氧16、氖20和镁24。当氦核大部用完时，核心部分重又冷却和收缩。接着温度再次提高，使碳、氧和氖核相互作用而形成硅族元素等，最后形成铁。由于铁是最稳定的元素，继续反应只能吸收能量，所以正常恒星炼制宇宙砖块的生产过程到此为止，这也说明了铁族元素丰度高得反常的现象。至于比铁重的元素，是在第二代恒星的晚期和超新星爆发中形成的。第一代恒星不断向空间发射微粒，当它们死亡时，常常会发生爆发而把它内部的从氢到铁的各种核抛射到空间中。在这些物质基础上凝聚而成的第二代恒星中，存在着碳。能量的主要来源不是质子-质子聚合，而是碳氮循环。当恒星达到晚期红巨星阶段时，其中少量的铁就会依次俘获中子而生成从铁到铅和铋这样的元素。而在此后的超新星爆发中，又会生成更重的元素，以至比铀更重的元素。

这样一种恒星窑炼制宇宙砖块的理论已经得到了许多实验资料的证明，成为我们今天关于元素起源的公认的理论。

宇宙的考古

在关于类星体的一章中，我们已经根据星系和类星体的演化关系，对宇宙作了一次考古。在这一章里，我们追溯了元素的产生过程，它们产生于宇宙演化的不同时代。我们能不能通过对这些元素的考察，再对宇宙作一番考古呢？如果这样的考古能够实现的话，将是范围更为广泛的考古，因为氘、氦等元素是在宇宙的高密态时期的后期生成的，我们的考古将可以上溯到那个时候。

在地质学和生物学的考古中，确定年代是个重要的内容。

确定年代的一个重要办法是放射性碳14纪年法。在我们对宇宙的考古中，也利用类似的方法来定年代。例如，重元素主要是在超新星爆发中合成的，它们从合成到今天经历了多少时间呢？我们举一个简单的例子来看天体物理学家是如何解决这个问题的。钍232和铀238是只能在超新星中形成的同位素，假定它们全部是在一次超新星爆发中产生的，那次爆发距今有多少时间了呢？为了寻找这个时间，我们必须知道它们在爆发中形成时丰度之比是多少。通过中子俘获的核物理理论的计算发现，两者当初丰度之比是1.9:1。另外，我们还要知道它们今天的丰度比，这就只能求助于实验了。地球上的岩石一般是不能用来测定该丰度比值的，因为这些岩石几经沧桑，成分可能发生了变化，测出的丰度比不能反映真实情况。为此，需要用陨石作标本，近年来又采用了月球上带回的试样，通过化学方法把前面说的两种同位素分离出来。这些同位素量当然是十分微小的，因此要采取严格措施防止沾染。通过质谱分析，这两种同位素的丰度比就得出来了，是4.0:1。丰度比的变化是这两种元素放射性衰变的速度不同所造成的，而这种速度通常用半衰期来表示，是一定量元素衰变掉一半所要的时间；该时间是一个恒定不变的量。根据实际测得的半衰期，我们便可推算钍232和铀238两种同位素丰度之比从1.9:1变为4.0:1，大约需要七十亿年，这就是产生它们的那次超新星爆发距今天的时间。天体物理学家运用更为精密的方法，并考虑了多次超新星爆发的影响，从许多对元素的丰度比计算了它们的年龄。已经得出重元素的年龄在七十亿年到一百五十亿年之间。

如果把重元素看成是中古时代遗留下来的古迹的话，那么象氘和氦这样的轻元素就可以说是远古时代的遗物了。产

生这些轻元素的时代当在宇宙的高温高密态时期；那个时期是天体物理学家很感兴趣的一段时间。根据对氘和氦的研究，应当能够获得有关那个时期的知识。可是上面谈到，氦也可能在恒星中由质子合成，这样生成的氦与我们感兴趣的氦是不能区分的。所以为了研究遥远的古代时期，最好是利用氘。它不会在恒星中合成，而只能在其中有所消耗。研究氘当然还是从它的丰度开始。地球上海水中每6600个普通氢原子才有一个氘原子，而地壳中氘的丰度则很不相同，所以这些值不能反映星际空间的平均值。要了解氘的真实丰度，应当到星际气体中去测量。氘能在92厘米波长处发射特征谱线，这是识别它的标志；可惜它们在宇宙中的丰度比氢要低得多，所以在六十年代初，完全没有测到氘的谱线。不过此否定结果也告诉我们，星际空间的氘的丰度比氢丰度要小一万三千倍以上，否则我们就会测到它。上面这个最高界限等于地球上氘丰度与氢丰度比值的一半。1972年，射电天文学家根据对银河系中心的观察，隐约地看到了氘的谱线，由此估计出氘和氢的丰度比值在1/3000到1/50000之间。另一方面，有一些射电天文学家确定了猎户座星云中氰化氘和氰化氢的比为1:170，该值虽然是很高的，但它不一定反映了氘和氢的比值，因为在星际云的环境中，氰基同氘的结合可能比同氢的结合容易得多。如果把这种化学方面的因素考虑在内，氘和氢之比可能会降低到1/100000。

当第三颗天文卫星——哥白尼卫星上天以后，天文学家利用它上面的紫外线望远镜对H_2和HD作了观察。这两种分子如同氰化氢和氰化氘一样，差别只在于有一个氢原子被它的同位素氘原子取代了。由此观察的结果同样也要考虑化学因素而进行修正，得出氘和氢的比是1:5000到1:500000之

间。哥白尼卫星还被利用来直接测量氘原子的吸收谱线，由此得出的氘和氢之比为1:70000。应当指出，以上种种测量都是在一些特定方向上进行的。因此，如果这些不同值真的反映了氘分布的不均匀性的话，那么就有理由怀疑各种以宇宙各向同性为前提的模型是否正确了。因为这类模型常常假定氘是在星系形成之前的高温高密时期形成的，当时的宇宙是各向同性的，因而氘的分布也应当是均匀的。

太阳系内，天文学家也在寻找氘的踪迹。阿波罗登月宇航员从月球上带回了一张收集太阳风离子的铝箔，科学家根据收集到的氦3来推测氘的丰度；因为据信，原始的太阳星云中的氘大多变成了氦3。由氦3推出在太阳系形成之初氘和氢之比为1:40000。另外，还有人根据对木星的观测，算出氘对氢的比是1:48000。当然，太阳系中的这些数据是它内部的演化过程的结果，未必反映宇宙的丰度。不过，天文学家就象考古学家一样，需要收集各种各样的标本。考古学家在各种地层中挖取化石，连一颗牙齿，一块打击的石器也不放过，甚至原始人烧过的灰烬，留下的脚印都要仔细研究一番。天文学家也用一切可能的方法收集来自宇宙的信息，从中提取他们所需要的情报。对于氘的观测，除了可以检验宇宙的各向同性之外，很重要的一点是它可以提供在氘生成那个时期宇宙的密度的消息。氘的生成量同这个密度值有很密切的关系。如果那时密度过高，氘会很快变成氦，于是氘就较少；反之氘就较多。因此根据氘的丰度可以推算出当时宇宙的密度，也可进而推算出今天宇宙的密度。

第十一章　背景辐射的启示

消除不掉的噪声

前几章中，我们已经把宇宙的考古工作推向越来越远的古代。类星体的时代，重元素形成的时代，再往前是什么时代呢？那个时代有什么遗迹留下来可供我们考察呢？这种遗迹确实是有的，它已经在1965年被两位美国射电天文学家(图11.1)——彭齐亚斯(A.A.Penzias)和威尔逊(R.W.Wilson)发现了。这项成就获得了1978年度的诺贝尔物理学奖，瑞典科学院在颁奖的决定中指出："彭齐亚斯和威尔逊的发现是一项带有根本意义的发现.它使我们能够获得很久以前、在宇宙的创生时期所发生的宇宙过程的信息。"



图11.1　发现背景辐射的两位美国科学家R.W.威尔逊(左)和A.A.彭齐亚斯(右)

这样一件意义重大的事是怎么发生的呢？说来也巧，它就发生在三十年前詹斯基第一次观测到来自宇宙的无线电波

的地方：贝尔电话实验室系统的霍姆代尔基地。而且同宇宙射电一样，这项发现也是在无线电通信的研究中偶然发现的。天文学中的发现，尤其是关于宇宙学的发现，有很多是偶然中得到的；这并不奇怪，因为我们在该领域中的知识还相当缺乏，常常根本不知道应该到哪里去寻找我们所需要的知识。

关于我们要说的这项发现，事情要从1964年说起。那时，贝尔电话实验室有一架卫星通信用的喇叭形天线。这架天线因为是喇叭形的，有很强的方向性，当它朝向天空时，地面和旁边的无线电干扰对它影响很小(见图11.2)。因此，这样的天线很有利于用来测量天空中各种原因造成的噪声。无线电工程师所说的噪声与日常生活中所谓的噪声不同，它指的是通信、广播中影响正常信号传送的各种无规则的信号。例如，电路本身也会产生噪声，这主要是电路材料中导电电子的无规则热运动造成的。一般来说，温度愈高，电子的热运动也愈剧烈，它的噪声也就愈大。因此，噪声的大小与温度有一定的对应关系。无线电工程师常用温度来标志噪声，有时，对



图11.2　发现微波背景辐射的贝尔实验室喇叭形天线

那种不是热运动造成的噪声，他们也给它一个对应的有效噪声温度，以此来表示各种原因的噪声的水平。比如地面温度约为300度K，它在一般射电望远镜中会造成20～30度的噪声。在我们所说的喇叭天线中，由于它的良好性能，地面噪声的贡献只有0.3度。

通信工作者为了提高通信的效率，长期致力于消除各种噪声的工作，或者至少也要查明各种噪声的原因。彭齐亚斯和威尔逊当初的研究工作，就是利用这架方向性很好的喇叭天线来查明天空中各种原因的噪声，也就是测量天空的有效噪声温度。要测量这个温度，除了要减小来自地面的干扰以外，还要尽量减小天线、接收器、波导管等等电路元件对于噪声的贡献。彭齐亚斯和威尔逊为此对仪器作了一番改进。他们制作了一个液氦冷却的参考终端，使天线温度可与之进行比较，用一个行波脉泽作接收器，保持在4度K的低温下。作了这些改进和其它一些工作之后，电路各部件的噪声温度大大降低，并有了比较精确的估计。

1964年5月，作了最初的测量，得到当喇叭天线朝向天顶时的有效噪声温度是6.7度。对于该温度，还应当扣除大气吸收、天线电阻损耗以及地面噪声的贡献，最后得到3.5度的剩余。彭齐亚斯和威尔逊检查了天线金属板的接缝，清扫了天线，仍然不能消除这个过剩的温度。在此后的将近一年的测量中，他们发现这个消除不掉的噪声是各向同性的，无偏振的，而且没有季节变化。是什么原因造成的呢？他们无法回答。只知道这样的辐射不可能来自任何特定的辐射源，因为它没有方向性。彭齐亚斯有一次在电话中同另一位科学家讨论了此现象，这位科学家说他刚收到普林斯顿大学来的一篇论文预印本，书中预言在3厘米处应有10度的噪声可以接

收到。于是彭齐亚斯和威尔逊向这篇论文的作者——普林斯顿大学的物理学教授迪克(R.H.Dicke)等人发出了邀请。1965年初，普林斯顿大学的研究组和彭齐亚斯与威尔逊进行了互访。他们终于确信，威尔逊和彭齐亚斯所发现的这种消除不掉的噪声正是迪克教授的研究组所预言以及准备寻找的东西。

普林斯顿大学的科学家作了什么样的预言呢？他们是怎么得出这种预言的呢？事情要从哈勃的河外星系红移的发现说起。在星系和类星体的章节里，我们已经介绍了这方面的内容。哈勃的发现告诉我们，宇宙中的星系都在互相远离，如果把这种相互远离的运动在时间上向过去追溯，就会得出它们过去都挤在一起的结论。那是一种高温高密度状态，在该状态中，当然是不会有星系和恒星存在的，有的只是粒子和辐射；普林斯顿大学的科学家们称其为"原初火球"。这"火球"以一次大爆炸为开始不断膨胀，物质在膨胀中逐渐冷却而凝聚为星系和星星，此即为哈勃所看到的正在相互远离的星系。但是"原初火球"还有一种遗迹，就是其中的辐射也会在膨胀中逐渐冷却，而且波长变长，到今天已经变成了微波，且为强弩之末，温度也只有几度了。这就是迪克等人所预言的"火球辐射"。

迪克等人在作出这项预言时，并不知道彭齐亚斯和威尔逊的工作，他们决定自己制造一架望远镜来搜寻火球辐射。1964年底，他们根据此任务的特殊性开始建造一架新型的望远镜。为了减少地面辐射的影响，把望远镜也做成喇叭形的；而且为了使接收器噪声不致干扰所要寻找的微弱信号，他们用了一个开关，使接收器输入在天线和一个参考源之间来回切换，每秒切换一百次。这样的周期性信号在接收器中尽管会被噪声所掩盖掉，但根据它的每秒一百周的特征可以同噪

声分离开来，从而测出不受接收器噪声影响的天线接收到的信号。这架新的望远镜还没有开始工作，他们就听到了彭齐亚斯和威尔逊的工作，在霍姆代尔，普林斯顿的科学家看到了那里的喇叭形天线竟和他们自己的不谋而合，只是在排除噪声干涉的细节方面有所不同而已。难怪贝尔实验室的科学家接收到了他们正在寻找的信号。

大爆炸和背景辐射

其实，关于原初火球的设想并不是迪克他们最初提出来的。关于它，要从历史上谈起。我们生活在其中的宇宙，它的本质和历史一直是人类所好奇的对象。哥白尼在他的划时代的《天体运行论》中写道，"太阳是宇宙的中心"。这就一笔勾销了地球和人类的"天之骄子"的地位，在认识宇宙的道路上迈进了很大的一步。天文学在此后的几百年发展中，已经把宇宙的范围一再扩大，到了二十世纪初，观测的范围已经远远越出了银河系，把数十亿计的河外星系都收进了我们的眼底。在这么一个其大无比的空间和时间范围里，宇宙是怎么演化和发展的呢？二十世纪的科学对这个问题的回答是在理论和观测两个方面的相互影响中前进的。爱因斯坦在1916年发表的广义相对论是一项关于引力、时空的理论。在1917年他就把它用来考察整个宇宙，得出了一个不随时间变化的、有限而无边的宇宙模型。这个模型之所以不随时间变化是因为爱因斯坦认为宇宙大尺度上的特征是不应随时间变化的，所以在理论中引进了所谓的"宇宙项"来实现了这一点。但是，后来俄国数学家弗里德曼(A.Friedmann)等人发现，广义相对论的场方程无需引进"宇宙项"，由它可以得到各种膨胀或收缩的宇宙模型。至于这些模型哪个更接近于真实地描述

了客观世界，这需要由实际情况来决定。就在这些理论工作的同时，哈勃根据对于河外星系红移的观测，提出了哈勃定律。该定律指出河外星系谱线红移与距离大致呈正比关系。这就提供了一幅真实宇宙正在膨胀的图景。哈勃定律的发现，不仅确定了宇宙膨胀的事实，也证明了广义相对论在讨论大尺度时空中是一种强有力的工具。

膨胀宇宙的图景在理论上和观测上都取得了初步的成功，这鼓励科学家进一步研究和完善这一模型。四十年代，美国的伽莫夫等人把当时的核物理和基本粒子的知识同宇宙的膨胀相结合，提出了大爆炸理论，并用它来说明了元素的形成。大爆炸理论认为，今天所看到的宇宙膨胀如果逆着时间追溯回去，将开始于一次猛烈的爆发。当时的宇宙是十分稠密的，而且处于一种高温状态。这样的状态下，物质将有频繁的核反应。各种原子核处在不断的合成与分解的过程中，当膨胀使宇宙稀薄和冷却下来时，核反应便停止，产生的元素就构成了今天的世界。上一章我们谈到，这个大爆炸生成所有元素的理论遇到一些重大困难，被后来的恒星和超新星合成元素的理论所取代，所以到六十年代，伽莫夫的大爆炸几乎已经被人遗忘了。

可是，人们同时也忘记了他们的另外一个预言，这个预言指出，大爆炸还有辐射遗留到今天。六十年代，迪克出于对膨胀宇宙开端的考虑，沿着类似伽莫夫的思路，又得出了原初火球的概念，并着手去寻找火球辐射；从大爆炸理论来看，也就是大爆炸遗留下来的辐射。大爆炸是怎么产生这种辐射的呢？原来，在开始的时候，宇宙的温度和密度都极高，整个范围达到热平衡。随着膨胀，宇宙中的辐射温度和物质密度都相应地降低，当温度降到一百亿度左右时，中子会衰变，或与

质子结合成氘核和氦核。当温度进一步降低到几百万度时，核反应的过程也告结束，这时物质是电子、质子以及氘核、氦核构成的等离子体。它们对于辐射是不透明的，因为那时它们还十分稠密，会吸收和发射辐射。大约在大爆炸后五十万年，宇宙的温度和密度降到了使等离子体凝聚为通常气体的时候。此后，物质和辐射便几乎不再相互作用了，热辐射可以在空间中自由穿行。打个比方说，宇宙在这个时候好象是一片混沌中豁然开朗，辐射冲破了“乌云”，照遍寰宇。这种辐射当初是可见光和红外线，由于红移，今天已经到了微波波段。看来，宇宙中一切物体都沐浴在一片光辉之中，所以人们称它为宇宙背景辐射。彭齐亚斯和威尔逊所发现的，是否确是这样一种辐射呢？为了最后确认这一点，科学家提出了一个检验办法：宇宙背景辐射来自热平衡的等离子体，它应当具有热平衡物体辐射的特征；也就是这种辐射强度随波长的分布应符合黑体谱的曲线。

于是，紧接着彭齐亚斯和威尔逊的发现，射电天文学家开始在各个波长处寻找这种辐射，测量它的强度。结果发现，所测得的背景辐射，强度随波长的变化恰好符合温度为2.7度K的黑体谱曲线。今天，人们已经在30厘米到0.5毫米的范围上测定了背景辐射的强度，证实它确实是黑体辐射(见图11.3)。于是膨胀的宇宙图景在哈勃的红移关系发现三十多年之后，又获得了第二个观测上的支柱。

关于大爆炸和宇宙的膨胀还需要说明，这不是物质在虚无的空间中膨胀或爆炸。这样的膨胀可以解释哈勃关系，却不能解释物质辐射在空间中的均匀分布，也不能解释背景辐射的存在，因为在此爆炸中，辐射总比物质更快地飞离爆炸地点，物质周围怎么还会有辐射呢？因此说，大爆炸是空间自身

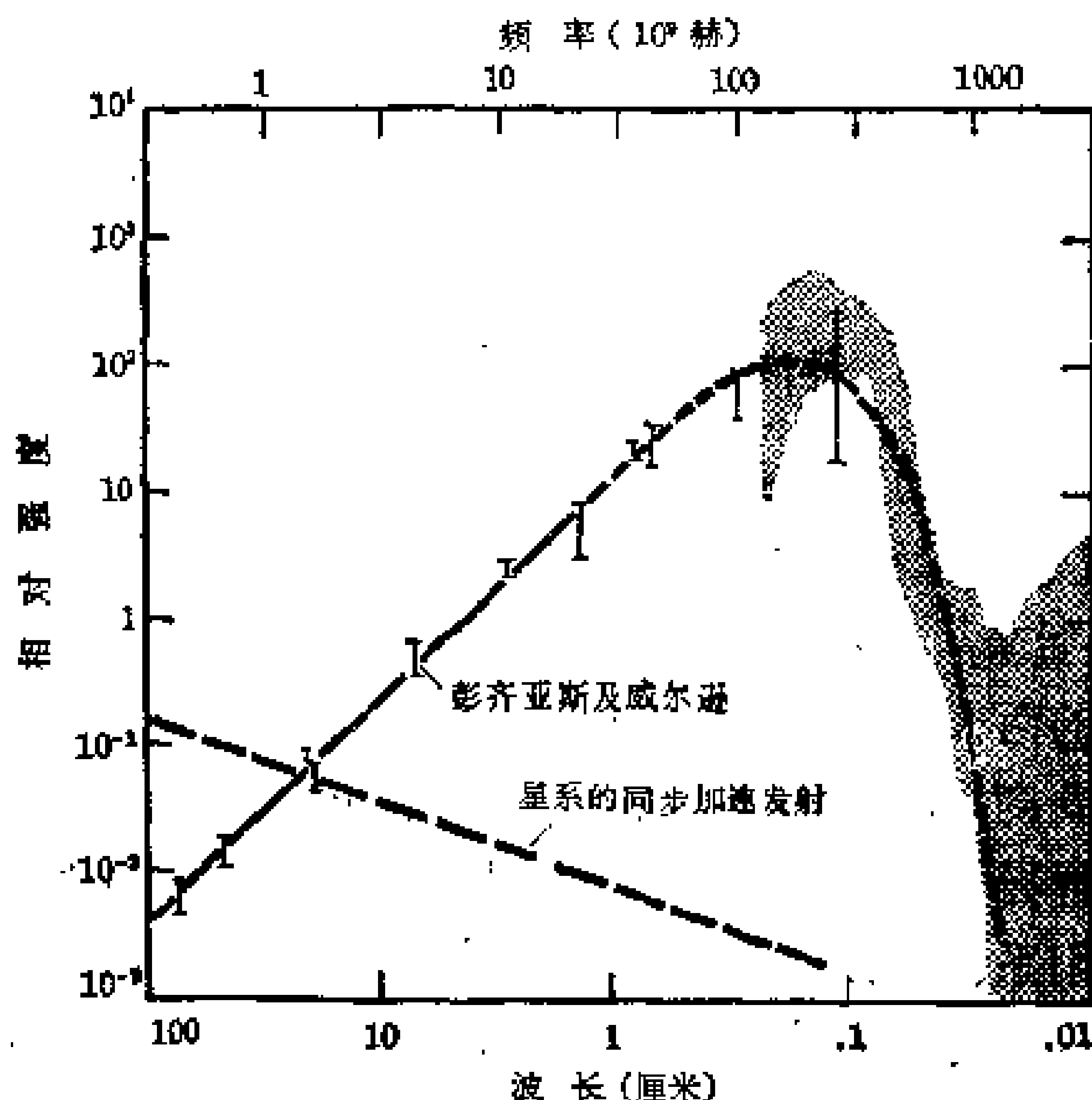


图 11.3 宇宙背景辐射的强度遵循黑体谱，对应的黑体温度是 3K。图中竖直线段表示各波长处测得的背景辐射相对强度，线段长度表示误差范围，阴影部分是用宽频带方法测得的高频部分

的膨胀，物质均匀分布在整个空间中，跟着空间的膨胀而变得越来越稀薄。这样的膨胀在大约 150 亿年前开始。经过大约 50 万年的膨胀和冷却，成为今天的背景辐射的光线便破雾而出。那个时候是混浊初开，我们的太阳系还要等 100 多亿年才会出生。这些辐射经过将近 150 亿年的长途跋涉，一路上因为宇宙的膨胀而路途越来越拉长，变成了今天的仅有 3 度 K 的微弱辐射。所以如果把我们对宇宙的考古看作是从一百多层的摩天大楼顶上向下看的话，那么我们看到的最遥远，从而

也是最古老的星系好比是看到了第六十层的景象。而类星体则是第二十层左右的地方。而背景辐射却是离地面——大爆炸只有一、二厘米处的东西！除了氘和氦以外，没有任何东西比它们更古老了！

各向同性说明了什么？

背景辐射的第一个特点就是它的各向同性。彭齐亚斯和威尔逊最初测量表明在各个方向上，温度的变化不大于百分之十。后来，迪克的研究组的人员经过一年的精细观察，发现地球的两极方向和赤道方向上，背景辐射的温度差别不大于0.015度K，也就是说，各向异性不超过百分之零点五的涨落，这样异常均匀的现象一方面更加说明这种辐射不可能起源于太阳系、银河系或某个任何特定的天体，而是起源于整个宇宙尺度上的某种过程；另一方面，它也反映了在大爆炸后五十万年的那个时期宇宙的均匀性。说明我们今天看到的星系、星系团或类星体等等天体，在那个时候还完全没有将要凝聚而成的迹象。如果当年混沌初开的时候，等离子体已经有了聚集成团的现象，那么今天的背景辐射也会在天空上出现相应的斑点。所以宇宙背景辐射告诉我们，在大爆炸的五十万年以后，宇宙仍是处在十分均匀的状态。星系等的凝聚肯定是这以后的事情。

宇宙背景辐射的高度各向同性还提醒人们建立这样一个参考系，在这个参考系中，宇宙背景辐射是完全各向同性的。对于这个参考系如果有相对运动的话，背景辐射就会显得不是各向同性，而会在运动的方向上，显得温度有所升高，在反方向上温度显得较低。这种运动是相对于背景辐射在其中为各向同性的参考系而言的。我们在地球上测得的高度各向同

性说明地球、太阳系以及银河系相对于这个参考系只有十分微小的速度。也就是说，对于远方的观测者来说，我们的地球、太阳和银河系正在参与整个宇宙的膨胀运动；除此之外，它们自身的运动是很小的。不过科学家还是想找出这种自身的运动；也就是说，希望发现我们的银河系除了具有同宇宙膨胀步调一致的运动以外，是否还有"不合群的"、"脱离集体"的小运动。这就要求我们更加精密地测量背景辐射的强度变化。这一点当然是十分困难的，不过这种"自由主义"的小运动也有容易测量的方面：它所造成的背景辐射的温度变化应当随观察方向与运动方向的夹角的余弦而变化。而变化的幅度也反映了运动的速度。

为了测出背景辐射的微小的各向异性，要消除多种干扰因素，其中最主要的是银河磁场中电子的同步加速辐射，而该

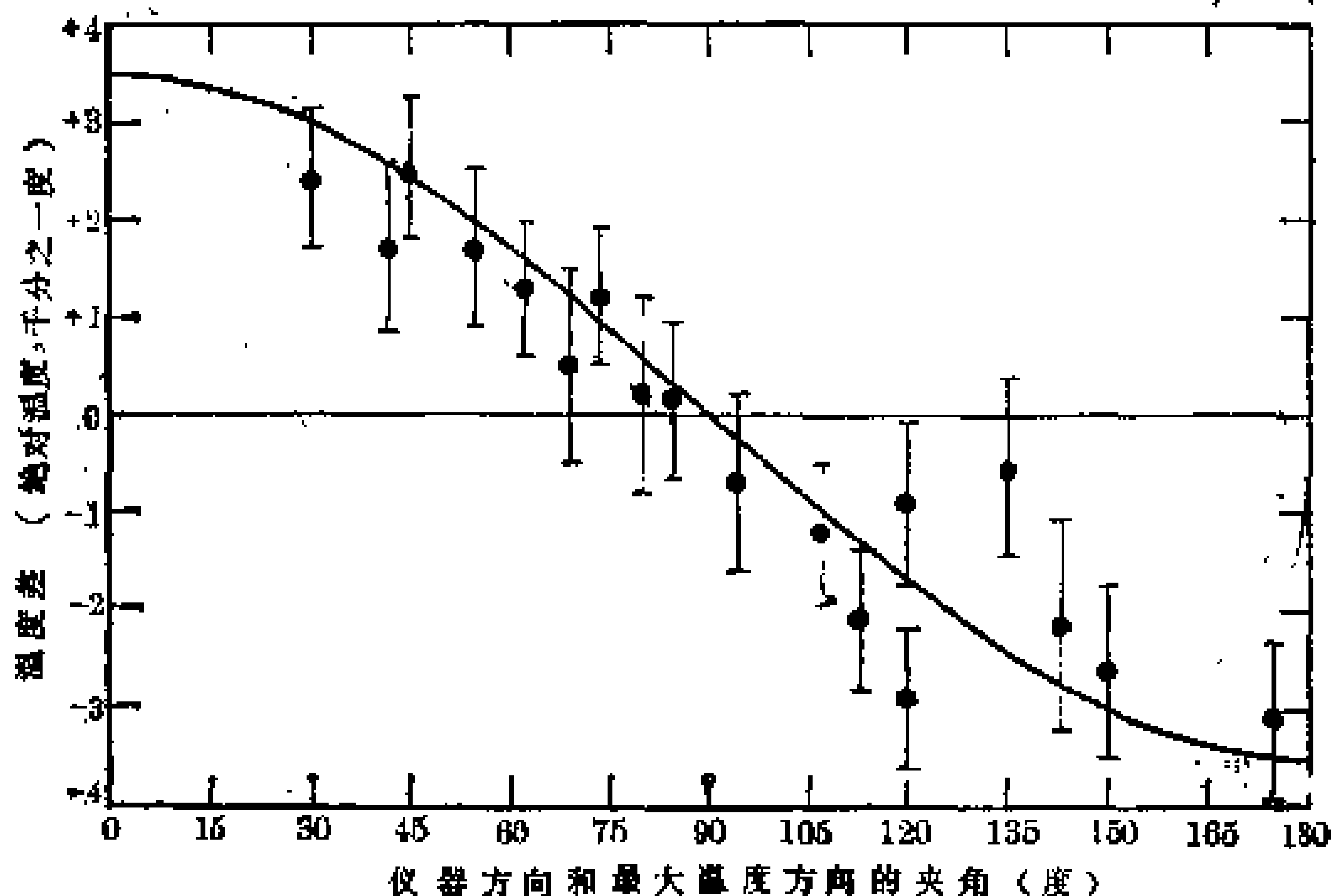


图11.4　仪器探测结果随方向而变的曲线，竖直线段表示测量的结果，中点为平均值，它们同余弦曲线吻合得最好

辐射在1厘米到3厘米波长间强度有很大的降低，同时背景辐射因为遵守黑体定律，所以强度却有很大的增加，这就提供了测量的好机会。可是在该波长处大气中水蒸汽和氧的发射干扰又特别大。因此最好是到大气稀薄的15公里以上的高空中去测量，于是劳伦斯伯克利实验室的一个研究组决定利用研究地球资源的U-2飞机来进行这项工作。同时，普林斯顿的研究组也正在设法用气球把仪器升上高空。经过三年的准备，劳伦斯伯克利实验室的仪器在1976年底开始了测量、为了让仪器扫过尽可能多的天空区域，以比较各方向上的背景辐射，测量进行了一年，得出了背景辐射温度确实随方向呈余弦变化的结果。普林斯顿研究组的结果也和这相一致（图11.4）。

他们的测量经过分析则说明，在大约离狮子座最亮的星轩辕十四不远的方向上，背景辐射温度最高，比平均值高出

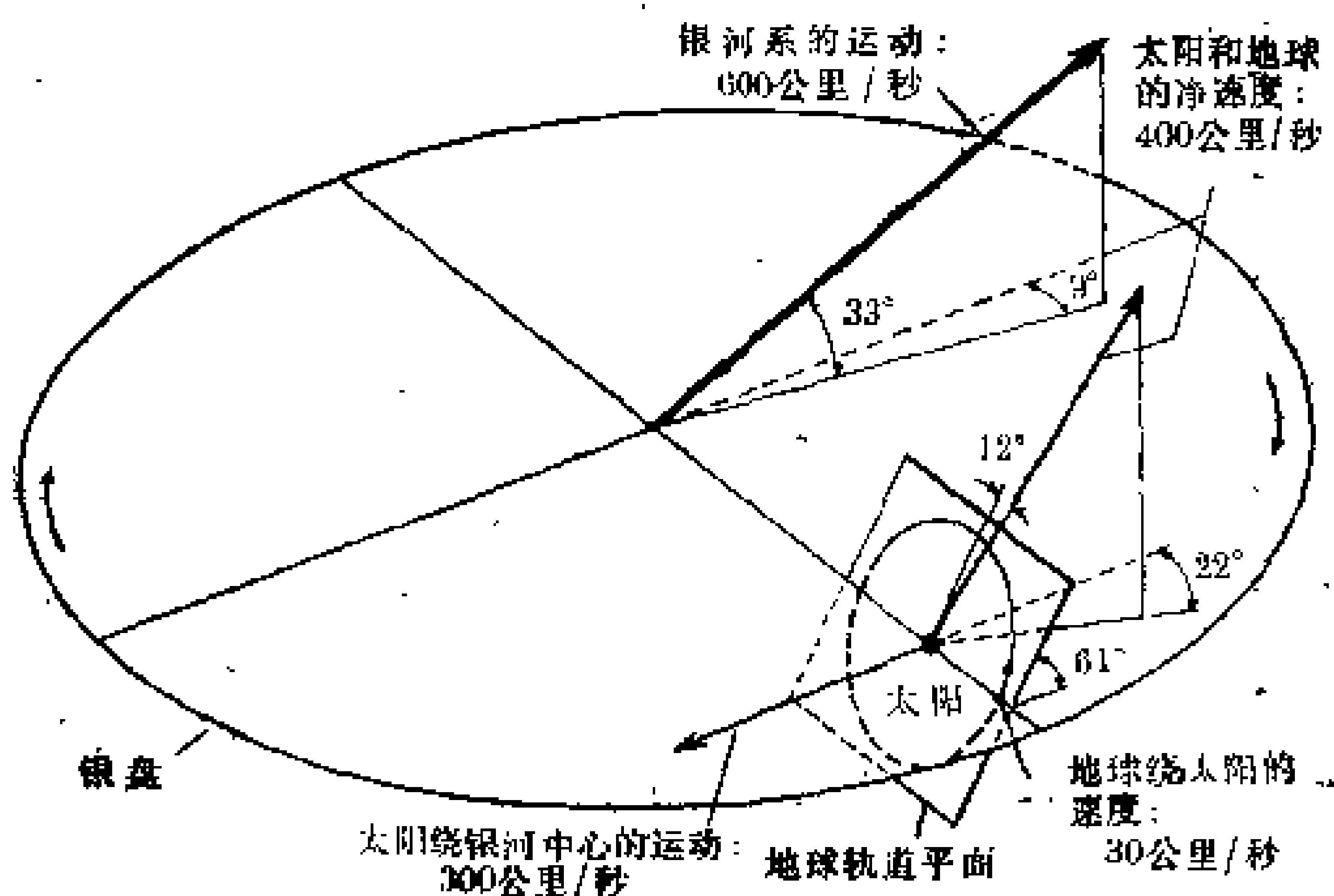


图11.5　根据背景辐射温度在不同方向上的偏差，可以推算出地球、太阳系、银河系相对于背景辐射的运动

0.0035 度。由此可计算出我们太阳系正以每秒 390 公里的速度向轩辕十四的方向运动(见图 11.5)；它同时正在以每秒 300 公里的速度绕银河系运转。可是这两个速度的方向并不一致，这说明我们银河系作为一个整体相对于背景辐射也有一个不小的运动速度；计算发现，速度有每秒 600 公里之巨。这样的精密测量除了得出了我们太阳系或银河相对于背景辐射的运动之外，还进一步得到：背景辐射除了上面这种因运动造成的各向异性之外，在各个方向上温度差别不超过三千分之一，把各向同性的测量又提高了很大的精度。

十九世纪的科学家把光比作声音，声音必须在空气中才能传播，光是在什么介质中传播的呢？他们假定有一种叫做以太的物质。以太起着传播光的作用，它充斥在整个宇宙空间里，却对在其中运动的天体毫无阻力。以太也提供了一个绝对的参考系，它是不动的，天体相对于它作各种各样的运动。后来的科学实验证明了以太是完全不存在的，宇宙中也不存在什么绝对参考系。这些发现导致了相对论的建立。今天，我们把背景辐射当作一个参考系，把天体的运动与之相比较。不过我们应当明白，这种参考系同古老的以太毫无共同之点，它是一个不断膨胀着的参考系，而且宇宙中的每一点都有各自的背景辐射参考系。

银河系居然相对于背景辐射有每秒 600 公里的高速，这是人们所没有预料到的。而人们已经知道，银河系正以每秒 80 公里的速度趋近我们的邻居——仙女座星云，这个速度与 600 公里/秒相比是很小的，说明仙女座星云也在与我们一起相对于背景运动。不仅如此，我们附近的这个星系群对于大星系团——室女座星系团的运动也不大，所以室女座星系团也有相对于背景辐射的速度。这么大尺度的天体系统对于背

景辐射的运动与背景的高度各向同性如何统一呢？当然，背景辐射所代表的是150亿年前宇宙的均匀性，那么今天的大尺度运动是来源于哪里呢？看来，我们正在开始探测到宇宙的一些大尺度的新的结构特点。

宇宙模型和实践标准

我们在前边讨论背景辐射的过程中，主要介绍了大爆炸理论对它所作的解释。这是不奇怪的，因为在宇宙学的形形色色的竞争模型中，预言了背景辐射存在的，只有大爆炸理论。大爆炸的模型不仅预言了背景辐射的存在，而且从统一的理论框架出发对它的黑体谱特征，各向同性等方面作出了解释，并说明了它的来源——原始等离子体中辐射的残迹。也正因为如此，在三十年代就已经初具形式的大爆炸理论在六十年代中期微波背景辐射发现之后，从原来长期默默无闻、几乎被人遗忘的地位一跃而成为许多人公认的宇宙模型。与此恰成对照的，是一度盛行的稳恒态宇宙模型的衰落。这种宇宙模型认为宇宙不仅在空间上各向同性，而且在时间上也是如此，过去、现在、将来，都没有什么变化。这种宇宙图景中没有背景辐射的地位，所以尽管有一批权威学者鼓吹，仍然免不了市场越来越小。这里可以看出，实践作为检验真理的唯一标准的巨大威力。

一个理论由于脱离"常规"，与传统观念格格不入，因而受到冷遇，直到由实践作出最后判决才被人们接受，这样的事在天体物理学的历史上是屡见不鲜的，尤其是在宇宙学中，因为它的对象是宇宙大尺度的运动规律，而这是一个我们完全陌生的领域。其中的一些规律是很难用我们日常的经验来理解的。例如宇宙学的第一个问题是大尺度宇宙有没有统一的运

动。在此问题上，传统的静态观是根深蒂固的。人们在长期的天文观测中养成了一种成见：虽然地球、太阳、银河等具体天体都在运动着，但是在更大的尺度上来看，天体应当是准静态的。这种成见有它认识论上的根源。天文观测虽然能发现天体系统在小尺度上的运动和变化，但整个天空在形态上的变化是极小的。这样的传统观念连爱因斯坦那么勇于同旧思想决裂的人也难免受它的束缚，以致他宁愿引进一个宇宙项来避免动态的宇宙解。直到河外星系红移的观测结果出现之后，爱因斯坦才认识到这是他"一生中最大的错事"。

大爆炸理论在宇宙膨胀的基础上又进一步指出，宇宙有着统一的起源和演化，随着膨胀，有一部热历史。它开始于一种高温高密度的状态，后来才演化出今天所看到的种种天体来。这样一种理论确实有点"异想天开"的味道。如果不是背景辐射的发现，是很难令人相信的。其实，在伽莫夫等人提出此主张的时候，要制造一架发现背景辐射所必需的天线也并不是做不到的。但是大多数人囿于传统，没有人认真对待他们的预言。致使这一重要的发现推迟了二十年之久。

可见，一切没有充分科学根据的传统观念，都不应当盲目地接受下来。对于它们的迷信，是科学进步的大敌。

大爆炸理论往往受到如下一种责难：大爆炸模型提出了宇宙的年龄和半径等等说法。这不是倒退回中世纪的有限宇宙论去了吗？这样的批评是不对的，什么是科学和中世纪宗教的根本区别？它并不在于承认还是否认宇宙体积的无限性，而在于科学依靠观察和实验来认识自然界，宗教则是屈从于神权。反对对于神的迷信，反对对于传统观念和教条的迷信，这才是科学的革命精神的真谛。

我们的宇宙有没有统一的起源，它的体积是有限还是无

限，这些问题是不能靠信仰、习惯和传统来回答的，只能靠建筑在实践基础上的科学才能来解决。广义相对论的建立以及它的证实、大尺度时空范围上天体运动规律的观测都表明，过去习以为常的欧几里得平直空间的无限性，并不是对客观世界的精确描写。而把空间看成是一个弯曲的闭合连续区可能更接近于真实情况，这样的连续区好象一个球的表面，它的体积(相当于球的表面积)是有限的，然而在其中运动总也不会遇到边界(相当于在球面上运动不会遇到边界)。此连续区还处在一种膨胀之中(相当于球面的胀大)。这样一种观点虽然不是绝对的真理，但它有事实为根据，比那种把体积无限性当作无需用实践检验的绝对真理那样的态度，不是更加科学吗？

膨胀宇宙有一个开端的问题，在数学上称为奇点，这也是人们批评大爆炸理论的一个根据。对这一点，爱因斯坦曾说过："人们不可假定这些方程对于很高的场密度和物质密度仍然是有效的，也不可下结论说'膨胀的起始'就必定意味着数学上的奇点。总之，我们必须明白，这些方程不可扩展到那样的一些区域中去。"就是说，广义相对论的方程是不能扩展到大爆炸最初的极高温高密状态中去的，它同一切理论一样有一定的适用范围。以广义相对论为基础的宇宙模型也有它的局限性，我们也应当用一种实事求是的态度来对待它。事实上，我们在讨论黑洞的一章中已经谈到，引力理论的量子化可能会对解决奇点问题作出贡献。

第十二章　并非结论的收尾

再谈两个事例

天体物理学是今天物理学中最活跃的领域之一。新的发现和理论层出不穷。要想在这样一本小册子中全面介绍是办不到的。不过到这里我们已经可以看到天体物理这门学科在今天的研究重点和特色了。大体来说，就是：一方面，研究快速多变的天体现象，如脉冲星、X射线源、类星体等；另一方面，研究涉及到我们宇宙的全局的一些整体问题，如膨胀、背景辐射等。在下面的两个较新的例子中，这种特色反映得十分清楚。第一个例子就是γ射线暴的研究，第二个是基本常数变化的问题。

γ射线暴是由维拉卫星首先发现的。“维拉”这个名字是西班牙文，意思是看守人。原来它是为了监督1963年签订的禁止核试验条约的执行情况而发射的。为此目的，卫星上装有为检测大气层和高空核爆炸产生的辐射所需要的仪器，其中检测γ射线的仪器是六个碘化铯晶体，当有γ射线穿过晶体时，它便发出可见光，这光转变为电脉冲后便记录下来。维拉卫星有许多对，先后成对发射到25万公里高的轨道上，每一对中的两颗卫星遥遥相对，于是地球上的每一部分都处于这些“看守人”的视线之内了。

为了弄清天然辐射对卫星检测器的影响，以避免造成同核爆炸信号相互混淆，维拉卫星对天然辐射也作了详细的研究，得到了许多宝贵的科学资料。这些资料被送回地面再慢

慢分析处理。1969年，科学家在1967年得到的资料中注意到两颗维拉卫星测到了相似的γ射线爆发的信号，测得的时间很接近，说明信号源与两卫星距离差不多。为了弄清这些源的确切方向，后来发射的卫星上的仪器提高了测量时间的精度。根据各卫星测得信号的时间上的细微差别，可以确定γ射线源的大体方位，排除了这些信号起源于太阳系内的可能。于是，宇宙γ射线暴这一新的天体现象便清楚地呈现在科学家面前了。1973年，宣布了这项新发现。

根据几年来的观测，γ射线暴每年大约出现12次，时间延续约0.1～100秒。卫星上接收到它们的能量平均为每秒每平方厘米10^{-4}尔格，这个数字也许不能给我们什么印象。可是如果将γ射线波段的这些能量转变为可见光，那么将和金星一样明亮，如此明亮的天体在天空中迅速闪烁，远古的祖先早就会把它们记录下来了。如果考虑这种γ射线源实际发出的能量，我们的印象就会更加深刻了。我们已经断定γ暴的源不在太阳系内，那么就假定它离我们三千多光年吧，这个距离在恒星中只是中等距离、只是我们到银河系中心距离的十分之一。再假定γ射线源是向四面八方均匀发射能量的，那么可以得出源的功率是10^{40}尔格/秒，比太阳在全波段上发射的总功率还要大二百五十倍。再进一步考虑这些γ暴源的尺度，就可以看出它们的惊人性质了。从观测知道，γ暴的辐射变化十分迅速剧烈。有的在几毫秒内可达到最大值，又突然中止(见图12.1)。根据我们在讨论类星体尺寸时类似的推理，可以知道这些源的尺度不会超过几千公里，有的甚至在几百公里以下。如此高的能量在这样小的范围内发出，可以得出单位面积发射功率比太阳还高出一百亿倍！如果这些γ射线源是银河系外的，那么以上数字起码还要加大一百万

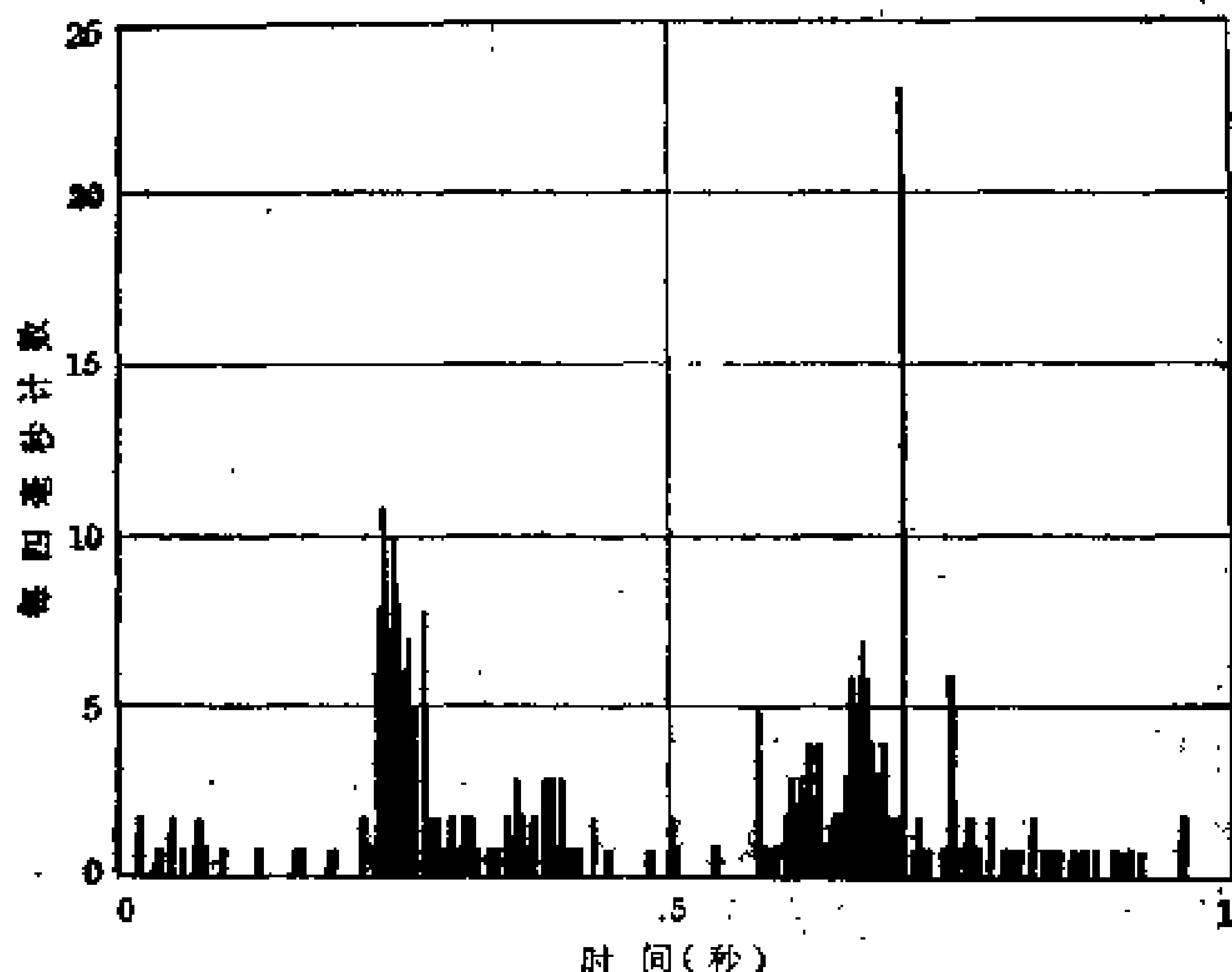


图 12.1 1976 年 1 月 23 日记录到的一次 γ 暴，卫星上的探测器每四毫秒作一次计数，显示出的是爆发头一秒内的情况，最高计数是 23 次。在此后四毫秒内一次计数也没有。说明这次爆发延续时间约二毫秒

倍！维拉卫星的任务是监测地球上的核爆炸，结果却发现了宇宙间的另一种迅猛无比的爆炸。它们到底是什么过程引起的呢？对于这个问题，目前有不下三十种答案，几乎涉及所有的高能天体过程，如中子星、白矮星、黑洞和超新星爆发、正反物质湮灭以及更离奇的一些模型。由于现在观测资料还嫌太少，不足以在这些众多的假说中作出鉴别。随着观测资料的积累，γ 射线暴的本质便会被揭示，甚至可能把我们对黑洞等高能天体过程的认识也提高一步。

关于自然界基本常数的变化问题，也是近年来科学界探讨的一个问题。自然界一切事物都处于永恒的变化之中，这种变化也有相对静止和稳定的一面。常数所表示的正是自然

界中比较长期稳定的一些关系，如普朗克常数、万有引力常数、电子的电荷、真空中的光速等等。既然这种稳定性是相对的，那么提出常数中至少有一些会发生变化的问题，并不是胡思乱想。当然基本常数的变化是不可能很大的，否则的话，就不会被人们认为是常数了。

常数的变化同宇宙学有很大的关系。一方面，因为常数的变化十分微小，只有在大尺度的时空上才会显示出这种变化的后果。更重要的是，常数如果有变化的话，其根源恐怕就在于宇宙的演化。具体来说，我们的宇宙的膨胀，会不会影响其中的物质之间的相互关系呢？最近几十年来，人们的注意力较多地集中在引力常数的变化上。我们知道，牛顿的万有引力定律写成数学公式就是

$$F=\frac{Gm_1m_2}{r^2},$$

其中 G 就是引力常数。它的变化反映了物质间引力相互作用的固有强度会发生改变。这当然是很使人感兴趣的。

著名物理学家狄拉克为了寻找 G 的随宇宙演化而变化的具体规律，注意到这样一个现象：一个电子和一个质子之间的静电吸引力比它们之间的万有引力大 10^{39} 倍左右：

$$\frac{e^2/r^2}{Gm_pm_e/r^2}\simeq 10^{39},$$

它说明了两种力量的对比关系。另一方面，如果把我们的宇宙大爆炸以来的年龄同光通过电子(经典)半径的长度所需要的时间相比，结果也是 10^{39}。它反映了宏观的宇宙同微观粒子之间的尺度比例。两个如此巨大的数字大致相等，是很难用巧合来说明的。狄拉克认为这反映了自然界的统一性，并提出了所谓的“大数假设”：这两个比值始终是相等的。可是

我们的宇宙在一天天变老，因此后面一个比值在一天天增大；为了保持两个比值相等，要求前一个比值也一天天增大。狄拉克的办法是让 G 一天天减小。

但是假设毕竟是假设，需要由实际的观测来检验。G 的变小会引起一系列的结果，例如，有人指出由于 G 的变小，地球离太阳越来越远，它过去一定比现在离太阳更近，因而也更为炎热。如果 G 每年的变化大于一百亿分之几，那么几亿年前地球上就会热得没有生命可以存在了；这同地质学上的证据是矛盾的。

1975年，美国海军实验室的范弗兰登(T.C.Van Flandern)宣布，他已发现 G 正以每年百亿分之一的速度减小。他提出的根据是：如果 G 变小的话，天体间引力会变弱，从而每个天体的轨道就会变大。例如月亮绕地球的轨道就会扩大，周期也会变长。范弗兰登宣称他确实找到了月亮周期的变长的证据。由于 1955年 以后发明了铯原子钟，从而有了不依赖于天体运动的精确的时间基准。范弗兰登根据那以后十几年间月掩星时间的精确记录，再排除潮汐摩擦等因素的影响，推算得了上述结果。这个变化极为微小，相当于月亮周期每年增长二千分之一秒，轨道半径每年增长四厘米。

当然，影响月球轨道变化的因素是很多的，除潮汐摩擦力以外，还有陨石对月球的冲击、其它天体的引力干扰、星际物质的阻力等等，也可能还有一些估计不到的原因。而且最近地球和行星科学的研究发现，地球半径在过去四十亿年中的变化不大于 0.8%，月球的半径只膨胀不到 0.06%，水星反而还稍有收缩。而根据 G 变小的假说，所有天体都应当在这段时间里有比较显著的膨胀。因此 G 是否变化的问题至今仍是一个悬案。人们正在期待进一步的实验。例如：月球的激

光测距实验，办法是从地球向月球发射一束激光，宇航员留在月球上的反射镜将它反射回来，测量光来回的时间，可以把月地距离测定得十分精确。还有的实验是对火星、金星用雷达的无线电波测距。这些实验的结果无论否定还是肯定引力常数的变化，都会对我们的认识有重要的贡献。

再谈大和小

在这本小册子的最初章节里，我们已经说过，物理规律和天文现象的结合，是天体物理学的基本研究方法。这种结合的一个重要方面，就是本世纪以来在微观领域中发现的物理规律，应用到预言和解释天文现象上。中子星的预言，就是这种结合的成功范例，这是微观的小宇宙同大宇宙的结合。

在今天的天体物理学中，人们仍在根据微观领域研究中提出的新思想，作出对天文现象的预言。这些预言初看起来有点不合"常理"，但是鉴于在对待中子星和背景辐射的预言方面的教训，我们最好还是不要过早地断言它们纯属幻想，而等待实际的观测来作出决定。

在快要结束本书的时候，我们再举两个这方面的例子，看看日后的科学发展会对它们作出什么结论。

第一个例子是关于反常中子星的预言。反常中子星由反常中子态构成。这种反常状态下的中子与正常中子的不同特点是它的等效质量几乎等于零。反常态粒子的概念是李政道等人在1974年提出来的；在地球上的实验室里，还没有观测到过。因为根据他们的理论，反常中子态只有在密度比原子核物质还要高的状态下才会稳定存在。那么高的密度在地球上是难以实现的，但在中子星内却有可能达到。因此，我国的研究人员提出了一项预言，认为中子星可能分为两种，一种是

正常中子星，由正常状态的中子构成；另一种是反常中子星，由反常状态的中子构成。当中子星的质量增大时，由于密度增高，原来正常的中子星可能会发生状态的转变而成为反常中子星。当正常中子星吸积周围物质时，就有可能发生这样的转变。根据预言，该转变也能释放出大量能量。也许，我们所观测到的脉冲星中就有一部分是反常中子星。如果这一点得到证实，那么关于恒星晚期演化的理论就要修改，而李政道等人的理论也将获得有力的证据。

第二个例子谈一下早期宇宙的演化。由于背景辐射的发现，推动人们进一步去探讨宇宙在发出背景辐射前的时期里所发生的物理过程。可以想象，那个时期的密度和温度将更高，物质和辐射发生着频繁的相互作用和转化。这正是高能物理学家梦想在实验室里实现的状态。因此，早期宇宙中的物理过程，主要是根据核物理和基本粒子的理论来预言的。

标准的“热大爆炸理论”为我们描绘了一幅早期宇宙的景象(见图 12.2)：宇宙在发出背景辐射的时候，温度大约是四千度，电子和质子、氦核以及少量的氘核相结合成为中性的氢、氘和氦原子，这便是最早生成的一批元素。

宇宙中的氦核、氘核等又是从哪里来的呢？它们可能是在大爆炸以后的几秒钟到 100 秒前后产生的。这时的温度有十亿到一百亿度，宇宙中只有中微子、电子以及它们的反粒子，还有少量质子和中子。随着膨胀，宇宙不断冷却，质子和中子相互结合便形成了氘和氦的核。今天的宇宙中，氦的含量占 20～30%。恒星内部的核反应是不可能产生如此多氦的，这也是人们相信曾发生过大爆炸的一个原因。

至于再往更早的时期，猜测的成分就更加多了。有一种看法试图把自然界的相互作用的起源同各种粒子的起源放在

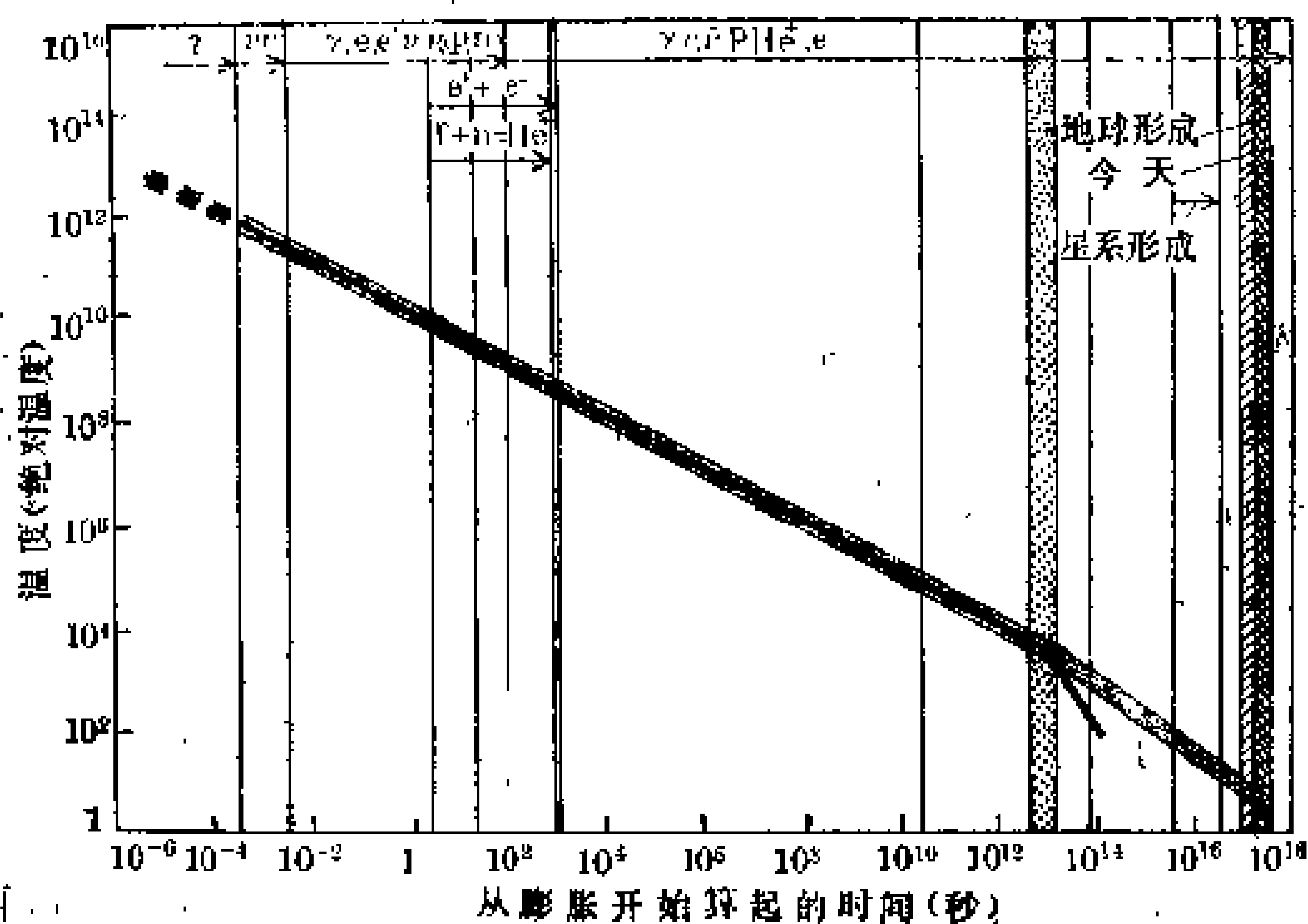


图 12.2　早期宇宙的演化。10^{-3} 秒之前的情况还不大清楚。10^{-2} 秒之前，中微子和反中微子同其它粒子有相互作用。10^{-2}～100 秒间是产生氦核的阶段。此后，宇宙中的主要成分是中微子、反中微子、质子、氦核、电子、光子等。10^{13} 秒时，电子与电离气体相结合，发出可见光，成为后来的微波背景辐射

一起考虑。认为在最初的宇宙中，物质是相互没有因果关系的。自然界的联系、相互作用是在大爆炸的极早阶段产生的。起初，只有一种形式的相互作用，称为超引力。物质也只有夸克和轻子——现在人们所知道的最基本的粒子。这一片夸克的海洋有人称之为"夸克汤"。随着膨胀，物质密度下降，超引力开始分化为不同形式的相互作用，最早出现的是引力，然后是弱相互作用和电磁力，最后是强相互作用。在此同时，物质在各种相互作用下结合成形形色色的粒子——质子、中子、介子、超子等。这整个过程可能是在大爆炸的最初千分之几秒内发生的。

再往前是什么呢？这就到了爱因斯坦所承认的理论极限了。在那种状态下，一般认为需要把广义相对论同量子论结合起来才能解释；这正是目前许多科学家致力探索的目标。

上面所描绘的大自然演化图景如果弄清楚的话，那么不仅我们今天的大宇宙的来历可以得到说明，而且自然界的四种相互作用和基本粒子的来龙去脉以及它们的相互关系也将被人们所理解。这样，对大宇宙的认识和对小宇宙的认识就不可分割地联系在一起了。

再谈天和地

自然界是一个统一的整体。从最小的粒子到行星、恒星、星系、星系团，都是这个统一整体中的一部分。它们的存在和发展都是同这个整体分不开的。这就提醒我们，自然界中局部的东西可能包含着宇宙整体的信息。

自从牛顿以来，人们在研究客观世界时，总是习惯于把局部的对象从整体中孤立出来处理。我们总是假定可以离开全局来探索局部的规律。这样一种分析问题的方法在科学的进步中起了巨大的作用。然而天体物理学发展到今天，提示我们从另一条道路来认识自然界。这是一个新问题。

例如，我们人类生存在太阳系的一个行星上，这是一个局部现象。从这个局部的事实出发，我们可以得到关于宇宙整体的一些什么信息呢？此问题似乎提得不着边际，但是认真思索一下，就会发现是很有启发性的。

生命在地球上能够繁衍生长，依靠太阳长期稳定地供应能量。这种能量是氢聚合成重元素的过程中释放出来的。这里，我们就碰到一个全局性问题了：氢在宇宙的全部物质中占绝大部分。如果不是这种状况，例如，如果宇宙中物质大多变

成了铁，那么这个世界将不会有恒星，也就不会有生命和人类了。或者宇宙中的恒星大多是氦组成的，虽然氦星也能释放能量，但寿命太短，生命将来不及在它的附近发展起来。前面说过，自然界的元素是在宇宙的高温高密状态下从最简单的氢聚合成氘和氦，又在后来的恒星内部合成更重的元素的。那么为什么大部分氢并没有变成氦呢？这是同早期宇宙的状况有密切联系的。

如果最初大爆炸的高温高密状态能维持一段较长时间不变，那么就有可能全部的氢都变成氦，但实际上，由于宇宙在那个时候的迅速冷却，大部分氢还来不及合成氦，宇宙就已经冷却到不能发生核聚变的地步了。而宇宙的冷却是膨胀引起的，膨胀的速度决定了冷却的速度。因此，今天宇宙中有大量氢残留下来，是同大爆炸以后几分钟内宇宙的膨胀和膨胀的快慢有直接关系的。正是当时的爆炸式膨胀，才使大量的氢保存了下来，这些氢后来在恒星内部缓慢地转化为重元素，给这个宇宙带来了光和热，为生命和人类的发生和发展准备了条件。只要当初的膨胀速度慢一点，就会有大量的氢聚合成氦，那么今天宇宙就不会这样星光灿烂了，生命和人类也将不会出现。

其实，生命同宇宙早期状态的关系还可以追溯到更远的时期。自然界的基本相互作用是在比氦形成更早的时期出现的。关于那个时期的状况，我们还很缺乏了解，不过它的后果却是很值得惊异的。如果当时形成的四种相互作用的强度稍微有点不同，那么今日的世界也将完全改观。例如，我们知道电子与质子的引力相互作用比电磁相互作用弱 10^{39} 倍。设想这个比例如果改变一下，那么恒星的寿命就会大大的不同，因为恒星的稳定基本上就是引力同热压力与辐射压力的平

衡。于是，也许等不到生命在行星上发展起来，恒星就开始坍缩了。

又例如，现在知道精细结构常数是1/137，这是一个表示基本电荷作用强弱程度的基本常数。如果当初由于某种原因，这个常数比1/137大一点或者小一点，那么撇开别的后果不说，氢原子的半径就会有所不同，它也许就不可能与碳形成种类繁多的碳水化合物。这样，以这种化合物为基础的生命当然也就不会出现了。精细结构常数是1/137，不大不小，这在目前完全是一个经验的事实。如果我们能够弄清极早期宇宙各种相互作用出现时的物理过程，相信这个数字的大小将会得到理论上的说明。

与此类似的基本常数有好几个，如电子的电荷、质量等等，为什么它们正好是这样大而不是别的大小？目前我们还无法回答。看来，用我们通常的把局部同整体割裂开来的研究方法，是很难回答上述的问题的。对宇宙的整体性质的研究，尤其是对早期宇宙的研究，似乎有希望对它们提供一个统一的理论解释。

上面的考虑还会得到这样一个结论：我们人类生活在这样一个宇宙中，是有很苛刻的限制的。只要自然界的安排出了差错，就不会有生命和人类出现了。例如一个没有恒星、没有氢的世界，是很难设想会让生命发展起来的。

对于这个问题，也有不同的解释。有的人认为，我们的宇宙确是十分特殊的地方。各种因素凑巧碰在一起才产生了这样一块适于生命发展的沃土。但这样一种巧合不应当解释为是某种自然界以外的力量的精心安排。而应当说，由于人类的生存要求一种特定的环境，因此她所面临的世界只能是这样一种特定的世界。那种没有星星、没有氢元素的世界是不

可能产生出有能力认识它的生命和意识的。在此意义上，我们人类对自己的认识对象是没有多大选择余地的。这是大自然的一种限制。

还有一种看法认为，在我们所认识的宇宙之外，还有着许多个，甚至无限多个宇宙。这些宇宙有着各种各样的环境，大多数并不适于生命的发展，但总有少数符合那种特定的条件，因而允许生命和人类的存在。我们的宇宙就属于这种宇宙。至于那众多的宇宙在何处呢？它们存在于我们的望远镜所能观察到的时间和空间范围以外。也许，大爆炸之前，就是另一个宇宙，我们的宇宙就是从那里脱胎而出的，但是大爆炸把从前那个宇宙的信息都抹掉了，这使我们觉得我们的宇宙是从一个所谓的“奇点”开始的。也许，我们的宇宙将来也要变成另一个很不相同的宇宙。

除了上述猜想以外，也有人根本反对我们的宇宙是特殊场所的观点。他们认为，我们的宇宙是自然界发展的必然结果。例如，早期宇宙尽管有种种可能的选择，但它们的发展必然会殊途同归，全都演变成能够使生命得以生存和发展的环境。因此我们的宇宙一点也不特殊。

广阔的宇宙等待人们去探索

虽然我们的宇宙是否是很特殊的地方，这个问题目前还没有定论，但有一点是肯定的，那就是经过了长时间的演化，终于出现了恒星、星系、行星，在地球这样的一个行星上，出现了生命，最后出现了人类。人类在自己的进步过程中不断探索周围的环境。他们用眼睛、望远镜和天线以及其它仪器捕捉来自天空的各种信号；后来，他们小心翼翼地跨出地球，攀登月球的山峰，让探测器飞入太空，穿透金星的浓雾，挖开火

星的土地……。在他们的不屈不挠的努力面前，大自然渐渐露出了自己的真相。人类——这种大自然演化的产物——终于能够在一个小小的星球上，面对着点点繁星、迢迢银河，回顾他们生活在其中的那个宇宙所走过的漫长道路，欣赏它内在的和谐与统一。在他们面前，浮现出当初大爆炸的辉煌场面，超新星的耀眼光芒，宇宙线不息的奔流，别的星球上欣欣向荣的生命世界……。

这本小册子向大家介绍的，就是人们探索宇宙的努力在近年得到的一部分成果。在我们回顾这些成绩的时候，不禁为科学所取得的进步而感到自豪。同时，正如我们已经看到的那样，每一项进步也带来了争论和新的问题。这就告诉我们，在探索宇宙的道路上，我们还有许许多多的问题需要回答。就在这本小册子里，至少还有如下一些问题没有给读者提供肯定的答案：

宇宙中的X射线，γ射线爆发是怎样产生的？

太阳的中微子发射为什么比预期值要小？

脉冲星的内部结构如何？它的转动能量是通过什么具体办法转变为辐射的？

黑洞在自然界真的存在吗？它们在哪里呢？

星系核和类星体有什么样的联系？它们的能量是从哪里来的？

星系和类星体的双源结构是怎么形成的？

星系和星系团中的“下落不明的质量”到哪里去了？

宇宙线是银河内产生的，还是银河外产生的？

宇宙中的有机分子是怎么形成的？它们同生命的发展有什么联系？

中微子和引力波的探测刚刚开始，它们将揭示出一些什

么样的新情况呢？会不会根本改变我们的宇宙观呢？

自然界的基本常数会不会有变化？

最后，还有一系列涉及到我们宇宙的根本性质的问题，除了在上面几节里列举的种种猜想以外，还有一些问题没有提到，例如：

为什么我们的宇宙空间是三维的？

为什么时间是一维的单向流动？

我们的宇宙为什么有各种对称性？

为什么我们的宇宙中反物质十分稀少？

大自然向我们显示的那一点真相是以千百年孜孜不倦的探索为代价的。更多的奥秘在等待着人们去探索，科学需要不迷信、不怕苦、勇于献身和善于思索的人们。

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝今日天体物理
作者＝
页数＝１９６
ＳＳ号＝０
出版日期＝
Ｖｓｓ号＝７５０２６７２５